

Titre: Identification et réduction du risque pour les interventions de maintenance et de production sur des presses à injection de plastique en entreprises
Title:

Auteur: Sabrina Jocelyn
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Jocelyn, S. (2012). Identification et réduction du risque pour les interventions de maintenance et de production sur des presses à injection de plastique en entreprises [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/802/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/802/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Yuvin Adnarain Chinniah
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

IDENTIFICATION ET RÉDUCTION DU RISQUE POUR LES
INTERVENTIONS DE MAINTENANCE ET DE PRODUCTION SUR
DES PRESSES À INJECTION DE PLASTIQUE EN ENTREPRISES

SABRINA JOCELYN

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AVRIL 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

IDENTIFICATION ET RÉDUCTION DU RISQUE POUR LES
INTERVENTIONS DE MAINTENANCE ET DE PRODUCTION SUR
DES PRESSES À INJECTION DE PLASTIQUE EN ENTREPRISES

présenté par : JOCELYN Sabrina

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Doct., président

M. CHINNIAH Yuvin, ing., Ph.D., directeur de recherche

M. OUALI Mohamed-Salah, ing., Doct., membre

REMERCIEMENTS

Merci à l'IRSST pour son soutien à la réalisation de ma maîtrise ès sciences appliquées (M.Sc.A) et de mon stage passionnant à l'INRS (France) dans le cadre de ma M.Sc.A.

Je remercie également :

- Yuvin Chinniah, directeur de recherche de mon mémoire, pour son encadrement tout au long de l'évolution de l'étude et ses commentaires constructifs ;
- l'équipe du laboratoire « Sûreté des systèmes automatisés » de l'INRS (France), notamment : Philippe Charpentier, James Baudoin, Jean-Paul Bello et Jean-Pierre Buchweiller pour le savoir qu'ils m'ont transmis avec enthousiasme et passion durant mon stage ;
- mes collègues de l'IRSST :
 - Christian Sirard et Damien Burlet-Vienney de m'avoir communiqué les informations techniques manquantes relatives à la machine étudiée lors du stage ;
 - Patrice Duguay, Daniel Vergara et Alexandre Boucher pour les données statistiques sur les accidents de la CSST liés aux presses à injection de plastique ;
 - Laurent Giraud pour ses commentaires et ses conseils fort utiles ;
- Réal Bourbonnière (consultant en sécurité des machines) et Barthélemy Aucourt (associé de recherche, École Polytechnique de Montréal), de m'avoir accompagnée lors des visites en usines et pour leurs précieux commentaires.

Un merci tout spécial à :

- mon époux pour son encadrement et les documents techniques qu'il m'a suggérés de consulter. Les lire a facilité mon intégration lors de mon stage ;
- mes parents et ma sœur, pour leur encadrement et leurs conseils judicieux m'ayant permis de trouver des visites en entreprises.

Un grand merci aux entreprises qui m'ont accueillie pour des visites instructives.

RÉSUMÉ

Dans le secteur de la plasturgie, les presses à injection de plastique horizontales, quoiqu'essentielles à la production de nombreuses pièces en plastique, occasionnent malheureusement des accidents du travail (ex. : amputations, écrasements de parties corporelles) pouvant aboutir à des décès. Les risques liés à ces machines se voient augmentés lorsqu'elles sont utilisées avec des équipements périphériques (ex. : robots, convoyeurs, escabeaux).

Cette étude vise à identifier les risques auxquels sont exposés les travailleurs lors des interventions de maintenance et de production dans la zone du moule de presses à injection de plastique horizontales ayant des équipements périphériques. L'étude vise également à identifier les moyens de réduire ces risques, afin d'en évaluer les principes en matière de sécurité. Dans le cas des moyens de réduction du risque faisant appel à des fonctions de sécurité, l'étude sensibilise l'intégrateur et le concepteur à l'importance d'adapter la fiabilité de la fonction de sécurité au niveau de réduction du risque requis. Cette sensibilisation se fait à travers une démarche de validation *a posteriori* du circuit de commande d'une fonction de sécurité d'une presse à injection de plastique horizontale. Quant aux risques et moyens de réduction du risque, ils sont d'abord étudiés dans le cadre d'une revue de littérature, puis lors de quatre visites en usines.

Les risques répertoriés dans la revue de littérature ne sont pas toujours associés à un contexte (c.-à-d., la tâche réalisée). Si le contexte est précisé, la description du risque gravite toujours autour de la presse ou de l'équipement périphérique. Cependant, lors d'une intervention sur une machine, on ne s'expose pas uniquement aux risques générés par cette machine, mais également aux risques provenant des autres éléments de la situation de travail (ex. : le lieu de travail, l'organisation). Alors, cette étude propose de réduire les risques liés à ces presses et leurs équipements périphériques, dans un contexte de maintenance et de production dans la zone du moule, en considérant l'ensemble de la situation de travail. De plus, l'étude porte un regard sur les pratiques en matière d'intégration de parties de systèmes de commande relatives à la sécurité et à la

coordination « presse-périphérique(s) », ainsi que les difficultés d'appliquer des prescriptions normatives lors de l'intégration, car dans la littérature, l'aspect intégration d'équipements périphériques au système de commande de ce type de presse n'est pas abordé.

D'une manière générale, il est ressorti que les méthodes de travail utilisées pour intervenir dans la zone du moule consistent en :

- l'usage de fonctions de sécurité liées à des protecteurs ou dispositifs de protection, lors de la production, ainsi que du polissage du moule et de son nettoyage (maintenance préventive) ;
- l'application du cadenassage, lors des réparations de la presse (maintenance corrective).

Les risques identifiés et les moyens de les réduire éclaireront les employeurs et les travailleurs du secteur de la plasturgie, dans leur exercice de prévention des accidents du travail. La démarche de validation *a posteriori* d'une fonction de sécurité (moyen de prévention intrinsèque) guidera les intégrateurs et concepteurs dans leur exercice de validation du circuit de commande d'une fonction de sécurité, tout en soulevant les difficultés de la démarche, celle-ci étant transposable à d'autres machines automatisées. Certaines difficultés de la démarche, tout comme celles qu'éprouvent les intégrateurs (électromécaniciens) rencontrés lors des visites, montrent qu'une norme en validation *a posteriori* simple à appliquer est requise plutôt qu'une norme de conception compliquée pour les intégrateurs du terrain. En effet, ces intégrateurs trouvent difficile de comprendre les normes actuelles de conception de systèmes de commande relatifs à la sécurité ou de les appliquer à de la validation *a posteriori* d'une fonction de sécurité.

ABSTRACT

Even if horizontal injection molding machines are essential to the plastic industries, unfortunately, they can cause injuries to the workers (e.g. amputations, crushing of body parts). Those injuries can lead to death. The risks related to those machines are increased when they are used with auxiliary equipments such as robots, conveyors and stepladders.

The aim of this study is to identify the risks to which workers are exposed during maintenance and production operations in the mold area of horizontal molding machine used with auxiliary equipments. Another aim of this study is to identify the means of reducing the risks to evaluate them on a safety aspect. In the case of security functions which are used as means of reducing the risks, this study increases integrators and designers' awareness of the importance of having a reliability that fits the required safety level. This is done through a retroactive validation process of the control circuit of the safety function on a horizontal injection molding machine. The risks and the means of reducing the risks are first looked in a literature review then, during four visits in plastic industries.

The risks mentioned in the literature review are not always mentioned in a context (i.e. the operation involved). When the context is mentioned, the risk explained always refers to the molding machine or its auxiliary equipment. However, during an operation on a machine, we are not only exposed to the risks regarding this machine, but also to those relevant to the other components of the work situations (e.g. location, organization). Thus, this study advises to reduce the risks related to these molding machines and their auxiliary equipment, within the maintenance and production context in the mold area, by taking into account the whole work situation. Moreover, since the integration aspect of auxiliary equipments to the control system is not mentioned in the literature, this study takes a look at:

- the practices regarding integration of safety-related parts of control systems and the coordination between the molding machine and its auxiliary equipments;
- the difficulties of applying standards requirements during integration.

Broadly speaking, it turned out that the work methods used to operate in the mold area are:

- the use of security functions related to guards or protective devices, during production, as well as mold polishing and cleaning (preventive maintenance);
- lockout procedure, when repairing the molding machine (corrective maintenance).

The identified risks and the means to reduce them will help employers and workers of the plastic industries in prevention of work injuries. The retroactive validation process of a security function (intrinsic prevention) will guide integrators and designers in the validation of control circuit of a security function, while highlighting the difficulties of the process. The suggested retroactive validation process is applicable to other automated machines. Some difficulties of the process as well as the challenges faced by the integrators (electromechanical workers) met in the visited enterprises show there is a need of having a retroactive validation standard easy to follow, rather than a design standard difficult to be used by the integrators of those enterprises. Indeed, those integrators often find difficult to understand the existing design standards regarding safety-related control systems, or to use them to a retroactive validation of a safety function.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
LISTE DES ANNEXES.....	xviii
AVANT-PROPOS	xix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Secteur de la plasturgie au Québec	3
1.2 Presse à injection de plastique horizontale : description.....	4
1.3 Identification du risque	7
1.3.1 Les presses à injection de plastique horizontales et leurs risques.....	8
1.3.2 Les équipements périphériques et leurs risques	10
1.3.3 Interventions dans la zone du moule : exemples d’accidents	12
1.4 Réduction du risque.....	14
1.4.1 Presse à injection de plastique horizontale seule : moyens de réduction du risque.....	18
1.4.2 Système « presse–périphérique(s) » : moyens de réduction du risque.....	24
1.5 Réflexion sur la littérature et choix pour l’étude	29

CHAPITRE 2	DONNÉES RECUEILLIES EN USINES.....	34
2.1	Présentation générale des visites effectuées en entreprises.....	36
2.2	Lieu : composantes du risque et moyens de réduction du risque.....	44
2.3	Tâche : composantes du risque et moyens de réduction du risque	47
2.4	Individu : composantes du risque et moyens de réduction du risque.....	64
2.5	Organisation : composantes du risque et moyens de réduction du risque.....	65
2.6	Moment : composantes du risque et moyens de réduction du risque.....	73
2.7	Équipement : composantes du risque et moyens de réduction du risque	74
CHAPITRE 3	ESTIMATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE D'UNE FONCTION DE SÉCURITÉ	93
3.1	Machine étudiée	95
3.2	Fonction de sécurité étudiée.....	96
3.2.1	Identification	97
3.2.2	Spécification.....	98
3.2.3	Niveau de performance requis	101
3.3	Chaîne de la fonction de sécurité : identification et fonctionnement.....	105
3.3.1	Circuit hydraulique.....	106
3.3.2	Circuit électromécanique	115
3.4	Calculs pour la validation architecturale.....	133
3.4.1	Contexte « laboratoire IRSST »	133
3.4.2	Contexte « usine ».....	134
3.4.3	Estimation vérifiée sur logiciel	136
3.5	Hypothèses de la démarche	141

3.5.1	Impact de certaines hypothèses sur le $PL_{réel}$	145
3.6	Récapitulatif de l'étude d'estimation <i>a posteriori</i> d'un PL	150
3.6.1	Impact de la personne qui valide.....	150
3.6.2	La notion de PL est relative	151
3.6.3	Démarche suggérée pour la validation architecturale d'une fonction de sécurité de machine	151
CONCLUSION		154
RÉFÉRENCES.....		157
ANNEXES		173

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Exemples d'accidents du travail liés à des presses ou leurs équipements périphériques	13
Tableau 1.2 : Efficacité des types de moyens de réduction du risque.....	17
Tableau 1.3 : Moyens de protection suggérés par les normes <i>ANSI/SPI B151.1-2007</i> et <i>NF EN 201:2009</i>	19
Tableau 2.1 : Mise en situation de la visite à l'usine A	36
Tableau 2.2 : Mise en situation de la visite à l'usine B.....	38
Tableau 2.3 : Mise en situation de la visite à l'usine C.....	40
Tableau 2.4 : Mise en situation de la visite à l'usine D	42
Tableau 2.5 : Composantes du risque propre au lieu	44
Tableau 2.6 : Moyens de réduction des risques inhérents au lieu	45
Tableau 2.7 : Facteurs de risque liés à la composante physique de l'activité et moyens de réduction du risque	49
Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque	51
Tableau 2.9 : Facteurs de risque liés à la composante sociale de l'activité et moyens de réduction du risque	63
Tableau 2.10 : Facteurs de risque liés à l'individu et moyens de réduction du risque.....	64
Tableau 2.11 : Risques liés aux outils utilisés par les travailleurs	75
Tableau 2.12 : Risques liés aux escabeaux et à la passerelle utilisés par les travailleurs	76
Tableau 2.13 : Risques liés aux machines utilisées par les travailleurs	77
Tableau 2.14 : Contribution des protecteurs pour la réduction du risque	78
Tableau 2.15 : Contribution des dispositifs de protection pour la réduction du risque ...	80

Tableau 2.16 : Contribution des dispositifs de sécurité pour la réduction du risque	83
Tableau 2.17 : Composants intégrés au système de commande des presses visitées	85
Tableau 2.18 : Influence de l'intégration sur les moyens de protection initiaux et la sécurité.....	86
Tableau 3.1 : Intervalle de fiabilité correspondant au PL [2]	94
Tableau 3.2 : Spécifications de la FS étudiée	99
Tableau 3.3 : Critères de satisfaction des catégories 3 et 4.....	103
Tableau 3.4 : Table de vérité caractérisant les ordres « OUVRIR » et « FERMER »	109
Tableau 3.5 : Tableau de Karnaugh de la fonction « OUVRIR »	113
Tableau 3.6 : Tableau de Karnaugh de la fonction « FERMER ».....	113
Tableau 3.7 : Fonctionnement normal avec protecteur de l'opérateur fermé	118
Tableau 3.8 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 1)	123
Tableau 3.9 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 2)	123
Tableau 3.10 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 4)	124
Tableau 3.11 : Où en sommes-nous pour satisfaire les exigences des catégories 3 ou 4 ?	131
Tableau 3.12 : Contexte « labo. » - Vérification des exigences de la DC_{avg} et du $MTTF_d$	133
Tableau 3.13 : Contexte « usine » - Vérification des exigences de la DC_{avg} et du $MTTF_d$	134
Tableau 3.14 : Mesures contre les défaillances de cause commune	135
Tableau 3.15 : Survol des trois outils logiciels	137
Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général	141

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Répartition des marchés du secteur québécois de la plasturgie.....	4
Figure 1.2 : Presse à injection de plastique horizontale [12]	5
Figure 1.3 : Cycle de production d'une presse à injection de plastique.....	6
Figure 1.4 : Principales zones dangereuses d'une presse à injection de plastique horizontale [25]	9
Figure 1.5 : Arbre des causes sommaire illustrant le processus accidentel	15
Figure 1.6 : Protectors d'une presse injection de plastique horizontale [12]	20
Figure 1.7 : Délimitation (en ovale) de la zone dangereuse concernant l'étude	33
Figure 2.1 : Représentation de la situation de travail.....	35
Figure 2.2 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine A	37
Figure 2.3 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine B	39
Figure 2.4 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine C	41
Figure 2.5 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine D	43
Figure 2.6 : Risque que le monteur-ajusteur de moule chancelle à cause des deux brides de serrage qu'il a posées sur le bâti de la presse	46
Figure 2.7 : Manutention manuelle du moule suspendu	48
Figure 2.8 : Cadenassage partiel observé : le cadenas bloque le protecteur de l'opérateur sur son rail	60
Figure 2.9 : Travailleur partiellement caché à l'arrière du plateau mobile.....	61
Figure 2.10 : Partie désengagée de la bordure sensible du protecteur de l'opérateur motorisé.....	62
Figure 2.11 : Trois travailleurs dans la zone du moule lors de son montage.....	64
Figure 2.12 : Travailleur installant un moule en s'agenouillant sur un convoyeur.....	68

Figure 2.13 : Chute d'évacuation où s'est introduit le travailleur.....	80
Figure 2.14 : Tapis (planchers) sensibles de la presse	82
Figure 2.15 : Agencement « interrupteurs/vannes-protecteurs » observés lors des visites	84
Figure 2.16 : Configuration retrouvée à l'usine A	88
Figure 2.17 : Configuration retrouvée aux usines B et D	89
Figure 2.18 : Configuration retrouvée à l'usine C	89
Figure 2.19 : Suggestion d'amélioration pour la configuration des usines B et D	90
Figure 2.20 : Suggestion d'amélioration pour la configuration de l'usine C	90
Figure 3.1 : Presse à injection de plastique horizontale de l'IRSST et son protecteur de l'opérateur [6].....	96
Figure 3.2 : Le protecteur de l'opérateur et ses interrupteurs actionnant le système de verrouillage du plateau mobile.....	99
Figure 3.3 : Circuit hydraulique de l'unité de fermeture de la presse [79]	107
Figure 3.4 : Circuit électromécanique de la chaîne de la FS.....	116
Figure 3.5 : Architecture propre à la FS étudiée	129
Figure 3.6 : Comportement du $MTTF_d$ et de la DC_{avg} selon le contexte d'utilisation ...	146
Figure 3.7 : Zones des faibles et fortes sollicitations de la presse	148
Figure 3.8 : Impact d'une DC non nulle au niveau du canal 2.....	149

Autorisations de reproduction de figures :

- La figure 1.4 extraite de la norme NF EN 201:2009 " Machines pour les matières plastiques et le caoutchouc - Machines de moulage par injection - Prescriptions de sécurité" figurant dans ce mémoire est reproduite avec l'accord d'AFNOR. Seul le

texte original et complet de la norme NF EN 201-2009 telle que diffusée par AFNOR Editions – accessible via le site internet www.boutique.afnor.org – a valeur normative.

- Les figures 1.2 et 1.6 correspondent aux figures 1 et 2 du document RG-670 de l'IRSST. Dans ce mémoire, elles sont reproduites avec l'autorisation de l'IRSST et de l'auteur de ces deux figures : M. Christian Sirard T.P. Ledit document RG-670 s'intitule : « Presse à injection de plastique horizontale – Grilles de vérification de la sécurité » et il s'agit ici de sa version datant de janvier 2011.
- La figure 3.1 correspond à la figure 4 du rapport R-557 de l'IRSST. La photo illustrée dans cette figure est reproduite, dans ce mémoire, avec l'autorisation de l'IRSST. Ledit rapport R-557 s'intitule : « La sécurité des machines automatisées - Analyse des risques et des moyens de protection sur une presse à injection de plastique » et il s'agit ici de sa version datant d'avril 2008.
- La figure 3.3 et la figure de l'annexe 7 sont reproduites avec l'autorisation de l'entreprise Arburg (fabricant de la presse à injection de plastique horizontale étudiée au chapitre 3 de ce mémoire).

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMDE	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets
AMDEC	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
API	Automate programmable industriel
APIdS	API dédié à la sécurité
ASP	Association sectorielle paritaire
CCF	Défaillance de cause commune (<i>common cause failure</i>)
CEI	Comité électrotechnique international
CLSC	Centre local de services communautaires
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec
DC	Couverture du diagnostic (<i>diagnostic coverage</i>)
DC _{avg}	Couverture du diagnostic moyenne (<i>average diagnostic coverage</i>)
EPI	Équipement de protection individuelle
FS	Fonction (s) de sécurité
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
INRS	Institut national de recherche et de sécurité (France)
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO	Organisation internationale de normalisation (<i>International organization for standardization</i>)
LSST	Loi sur la santé et la sécurité du travail
MTTF _d	Temps moyen avant défaillance dangereuse (<i>mean time to dangerous failure</i>)

PFH _d	Probabilité de défaillance dangereuse par heure (<i>probability of dangerous failure per hour</i>)
PL	Niveau de performance (<i>performance level</i>)
PL _r	Niveau de performance requis (<i>required performance level</i>)
PL _{réel}	Niveau de performance effectif de la partie d'un système de commande relative à la sécurité
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SIL	Niveau d'intégrité de sécurité (<i>safety integrity level</i>)
SRP/CS	Partie d'un système de commande relative à la sécurité (<i>safety-related part of a control system</i>)
SSA	Laboratoire : « Sûreté des systèmes automatisés » de l'INRS (France)
SST	Santé et sécurité du travail
TMS	Trouble musculo-squelettique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 :	Zones dangereuses d'une presse à injection de plastique horizontale.....	173
ANNEXE 2 :	Presses à injection de plastique - débours de la CSST.....	175
ANNEXE 3 :	Détails sur les exemples d'accidents liés aux presses à injection et leurs équipements périphériques.....	176
ANNEXE 4 :	Outil de collecte de données.....	179
ANNEXE 5 :	Étapes observées pour les tâches exécutées lors des visites en usines.....	196
ANNEXE 6 :	Classification des normes françaises et internationales en sécurité des machines.....	201
ANNEXE 7 :	Circuit hydraulique de la presse de l'IRSST.....	202
ANNEXE 8 :	Circuit hydraulique : identification et rôle des composants.....	203
ANNEXE 9 :	Bref rappel sur la logique booléenne.....	205
ANNEXE 10 :	Comportement de la FS en présence de défauts.....	206
ANNEXE 11 :	La directive « Machines » européenne.....	233
ANNEXE 12 :	Caractéristiques des composants de la FS.....	235
ANNEXE 13 :	Calculs pour les contextes : « labo. » et « usine ».....	240
ANNEXE 14 :	Contexte « labo. » - résultats obtenus avec SIStema.....	245
ANNEXE 15 :	Contexte « usine » - résultats obtenus avec SIStema.....	247

AVANT-PROPOS

Ce mémoire s'entreprend dans le cadre d'une activité de recherche de l'École Polytechnique de Montréal et de l'IRSST¹. L'activité de recherche s'intitule : « Sécurité des presses à injection de plastique ayant des équipements périphériques lors des interventions de maintenance et de production en entreprises ». Le mémoire est donc réalisé dans le domaine de la sécurité des machines industrielles. Le mémoire et l'activité de recherche proviennent d'une problématique soulevée par des représentants² du secteur de la plasturgie au Québec : les risques des presses à injection de plastique sont assez connus, mais ceux liés à l'interaction entre ces presses et leurs équipements périphériques (ex. : robots, convoyeurs, granulateurs, appareils de levage, escabeaux, escaliers) sont moins connus par les gens du milieu. À la lecture de rapports d'accidents, nous constatons que l'élément causal d'accidents survenant sur ce type de presse, peut provenir de la presse, mais aussi d'un équipement périphérique.

Ces représentants sont animés d'un même but : trouver, par la réalisation d'une étude, des réponses aux trois points ci-dessous :

- comprendre les risques, pour le travailleur, liés à l'interaction entre ce type de presse et leurs équipements périphériques lors des interventions de maintenance et de production ;
- évaluer les principes de sécurité appliqués au niveau des moyens de réduction du risque utilisés sur le terrain ;
- émettre des recommandations en matière de sécurité de ces interventions.

¹ Organisme subventionnaire de l'activité de recherche. L'IRSST a pour mandat : promouvoir, par la recherche, la prévention des maladies et des accidents dans les milieux de travail, ainsi que la réadaptation au travail.

² Ces représentants constituent le comité de suivi de l'activité de recherche.

Afin de répondre à la problématique, ce mémoire alimente l'activité de recherche en caractérisant les opérations de maintenance et de production de travailleurs intervenant dans la zone du moule de presses à injection de plastique horizontales ayant des équipements périphériques. Par cette caractérisation, les risques et les moyens de réduction de ces risques sont identifiés et commentés, afin de mieux outiller les entreprises en matière de prévention. Un des moyens de réduction du risque ciblé est la sûreté du système de commande relatif à la sécurité coordonnant la presse et ses équipements périphériques. Les difficultés liées à l'intégration de dispositifs de sécurité pour cette coordination et les risques pouvant en découler seront identifiés. Or, qui dit sûreté, dit fiabilité. Or, « fiabilité » introduit le terme « probabilité de défaillance dangereuse » que nous retrouvons dans les normes dédiées à la conception de systèmes de commande relatifs à la sécurité : *CEI 62061* [1] et *ISO 13849-1* [2]. Ce mémoire, propose une démarche permettant d'estimer, *a posteriori*, le niveau de performance (PL) d'une fonction de sécurité (FS)³ d'une machine. La *NF EN ISO 13849-1:2008* (ou *ISO 13849-1* pour simplifier) définit ainsi le PL : « niveau discret d'aptitude de parties relatives à la sécurité à réaliser une fonction de sécurité dans des conditions prévisibles » [2]. Cette démarche se veut transposable à toute machine automatisée. À défaut de quantifier exactement la probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFH_d) d'une FS d'une machine, cette démarche permettra aux intégrateurs d'estimer la plage d'appartenance de la PFH_d en utilisant la norme *ISO 13849-1*. Finalement, les limites d'une telle démarche sont également mises en relief.

Il est important de noter que, dans ces deux normes, le terme « défaillance dangereuse » ne signifie pas d'emblée que cette défaillance engendrera un phénomène dangereux ou un état défectueux. Ce terme évoque de préférence la potentialité pour cette défaillance à causer un phénomène dangereux ou un état défectueux. Contrairement à ces normes qui

³ Une FS est une fonction qui, sans être nécessaire au fonctionnement d'une machine, assure la sécurité de l'utilisateur de la machine [3]

incluent le caractère « potentiel » à la définition de « défaillance dangereuse », dans ce document nous ne le ferons pas. L'expression « défaillance potentiellement dangereuse » sera utilisée à la place de l'expression « défaillance dangereuse » des normes ; tandis que nous utiliserons le terme « défaillance dangereuse » pour signifier que la défaillance en question engendre certainement un phénomène dangereux ou un état défectueux. Cela permettra d'éviter de confondre le lecteur, puisque intuitivement, il peut être porté à croire qu'une défaillance dangereuse conduit systématiquement à un phénomène dangereux ou un état de défectuosité.

Enfin, pour faciliter la compréhension du dernier chapitre de ce mémoire, une connaissance élémentaire de la norme *NF EN ISO 13849-1:2008* est conseillée.

INTRODUCTION

Dans les milieux de travail, la LSST exige la participation des travailleurs et employeurs, ainsi que de leurs associations respectives pour poursuivre l'objectif d'élimination des dangers à la source et ce, dans le but d'assurer « la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs » [4]. Il s'agit donc d'une « responsabilité partagée » [5] entre ces différents intervenants.

Dans le secteur de la plasturgie, les presses à injection sont des machines connues pour les accidents graves (ex : écrasement, décès) qu'elles occasionnent [6, 7]. Pour prévenir les lésions professionnelles en plasturgie, l'École Polytechnique de Montréal et l'IRSST, à la demande de représentants du secteur, ont lancé une activité de recherche sur la sécurité des travailleurs lors de la maintenance et de la production sur des presses à injection de plastique horizontales ayant des équipements périphériques⁴ (ex. : robot, convoyeur). En effet, ces équipements créent des risques supplémentaires aux interventions sur la presse. Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de cette activité de recherche et vise à :

1. identifier les risques menaçant la santé et la sécurité des travailleurs lors des interventions de maintenance et de production dans la zone du moule de presses à injection de plastique horizontales ayant des équipements périphériques ;
2. identifier les moyens utilisés pour réduire ces risques ;
3. évaluer les principes de sécurité appliqués à ces moyens de réduction du risque ;
4. dans le cas où ces moyens de réduction du risque sont des fonctions de sécurité (FS) associées à des moyens de protection (ex. : protecteur verrouillé, tapis sensible) ou des dispositifs de sécurité (ex. : bouton d'arrêt d'urgence) :

⁴ Équipements périphériques : équipements situés autour de la presse et qui interagissent ou non avec elle.

- sensibiliser le lecteur à l'importance d'une fiabilité adaptée de la FS au niveau de réduction du risque requis ;
- faire un transfert de connaissance sur la validation *a posteriori* du circuit de commande d'une FS afin d'estimer sa fiabilité.

L'atteinte de ces objectifs se réalise en parcourant trois étapes :

- I. élaborer une revue de littérature (cf. chapitre 1) afin de situer ce mémoire par rapport aux écrits sur les risques et moyens de réduction du risque liés aux presses à injection de plastique et leurs équipements périphériques ;
- II. réaliser des visites en usines permettant d'obtenir de l'information sur ces risques et les moyens de les réduire dans les situations de travail liées auxdites interventions de maintenance et de production (cf. chapitre 2) ;
- III. entreprendre une démarche d'estimation *a posteriori* du niveau de performance d'une FS (cf. chapitre 3) afin d'en évaluer la fiabilité.

Les deux premiers chapitres s'adressent notamment aux travailleurs sur ces presses, leurs employeurs, ainsi que les intégrateurs et concepteurs de systèmes de commande relatifs à la sécurité. Le troisième chapitre est destiné plus spécifiquement aux intégrateurs et concepteurs.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

Le chapitre 1 situe le contexte. Nous y présentons le secteur de la plasturgie au Québec, une description d'une presse à injection de plastique horizontale, les risques inhérents à ces presses et leurs équipements périphériques, ainsi que les moyens de les réduire. Pourquoi des presses à injection de plastique horizontales ? Même s'il existe des presses à injection de plastique verticales, l'étude ne concerne que les horizontales puisqu'elles sont plus répandues [8].

1.1 Secteur de la plasturgie au Québec

En 2008, au Québec, le secteur de la plasturgie comptait 345 entreprises embauchant 25 200 personnes [9]. Ce secteur comprend différents marchés ayant des activités diverses dont la répartition est illustrée à la figure 1.1 [10]. D'après Industrie Canada [11], deux sous-secteurs de la plasturgie interviennent dans la réalisation de ses activités : le sous-secteur des machines et celui du moulage. Le sous-secteur des machines regroupe les fabricants de machines intervenant dans la réalisation des produits en plastique. Ces produits sont créés à partir de procédés tels que : l'extrusion, le thermoformage, le moulage par soufflage, le moulage par rotation et le moulage par injection. Le sous-secteur du moulage consiste notamment à produire des moules. Chaque production d'un modèle de pièce en plastique requiert son propre moule, afin de répondre aux spécificités du client. Ce moule est installé sur la machine (la presse) qui fonctionne selon l'un des procédés susmentionnés. À chaque production d'un nouveau modèle de pièce, un changement de moule s'impose, suivi d'essais de production pour vérifier le réglage adéquat de la presse. De la maintenance (préventive et corrective) est également réalisée afin d'assurer la productivité de la presse et du moule.

Dans cette étude, nous entendons par production toute opération consistant à mouler des pièces, changer un moule, installer des inserts sur le moule, entreprendre des essais de production. Nous entendons par maintenance, les opérations d'entretien (ex. : purge et nettoyage du moule) et de réparation de machine.

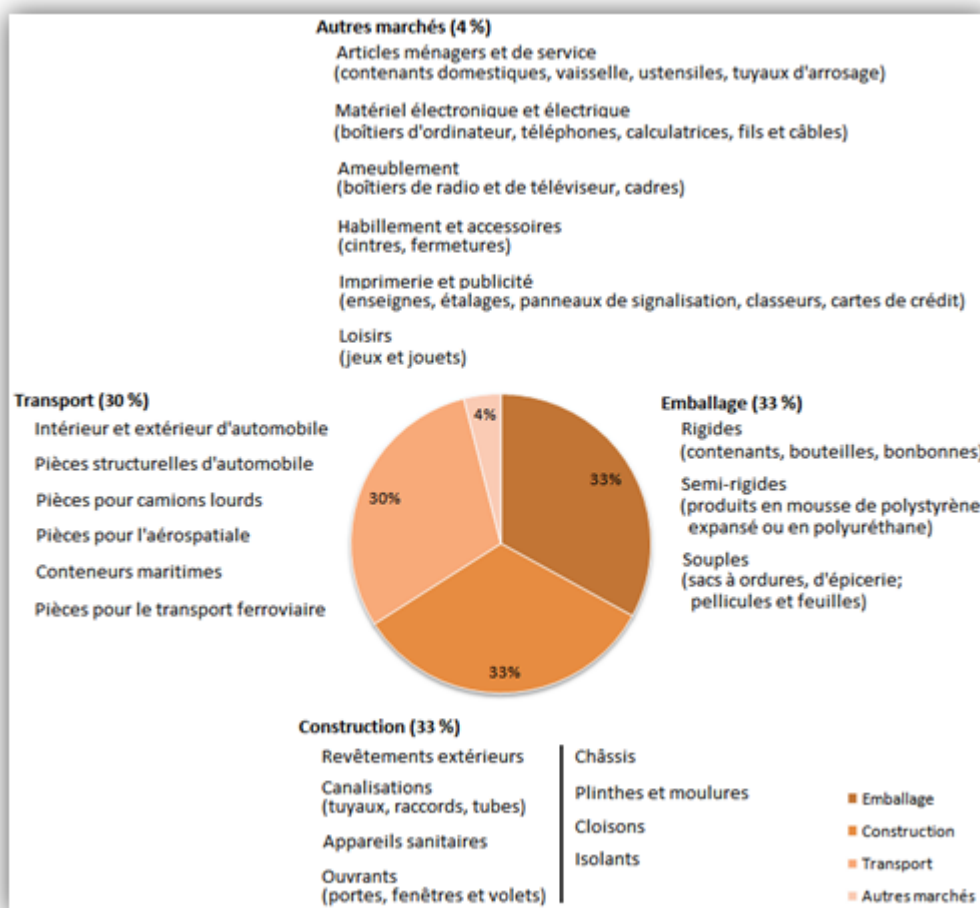


Figure 1.1 : Répartition des marchés du secteur québécois de la plasturgie

1.2 Presse à injection de plastique horizontale : description

Les presses à injection de plastique (cf. figure 1.2) sont des machines permettant de produire des pièces en plastique par le procédé de moulage par injection. L'appellation « horizontale » vient du fait que l'unité de fermeture, l'unité de plastification et d'injection de la presse sont montées horizontalement. La figure 1.2 présente les composantes d'une telle presse [12] :

1. plateau arrière fixe ;
2. mécanisme de fermeture (ex. : genouillère, vérin) ;
3. éjecteur ;
4. plateau mobile ;
5. colonne de guidage ;

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 6. plateau fixe d'injection ; | 13. goulotte d'alimentation ; |
| 7. buse d'injection ; | 14. motorisation de la vis ; |
| 8. tête du baril ; | 15. évacuation des pièces ; |
| 9. collier chauffant ; | 16. moule ; |
| 10. baril d'injection ; | 17. console de commande ; |
| 11. vis sans fin ; | 18. bâti. |
| 12. trémie d'alimentation ; | |

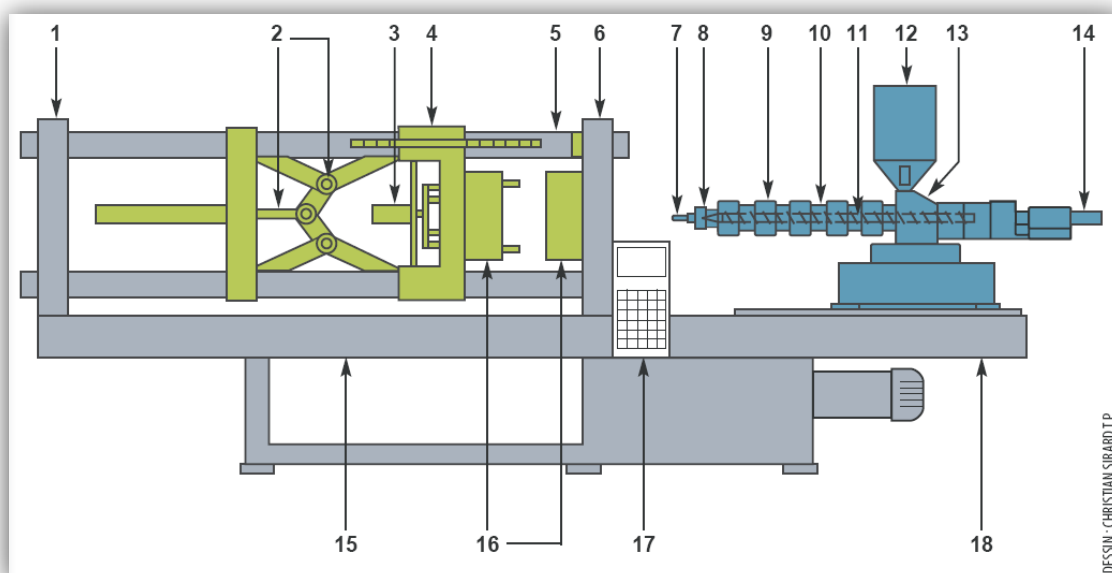


Figure 1.2 : Presse à injection de plastique horizontale [12]

D'une manière générale, la presse fonctionne ainsi [6, 13, 14] :

Des granules de plastique se trouvent initialement dans la trémie. La trémie est alimentée manuellement ou par un système automatisé. Les granules sont acheminées par gravité à la goulotte d'alimentation. Ensuite, selon la presse, l'un des trois procédés suivants chauffe les granules de plastique à très haute température (pouvant atteindre 200 C [15, 16]) grâce à un apport d'énergie :

- 1) **thermique** : par les colliers chauffants qui sont des éléments thermo-régulés ;
- 2) **mécanique** : par le cisaillement des granules de plastique et du plastique fondu ;

3) thermo-mécanique : par la combinaison d'une vis sans fin (qui tourne et translate) et de colliers chauffants (cas présenté à la figure 1.2).

Cette haute température provoque la fusion des granules de plastique. Le plastique fondu se déplace dans le baril d'injection grâce à la vis sans fin. Cette vis, en translatant vers l'unité de fermeture, sert aussi de piston pour injecter le plastique fondu dans les empreintes du moule fermé, en imposant une pression ou un débit à travers la buse communiquant avec un orifice de la partie fixe du moule installée sur le plateau fixe. Les empreintes (cavités du moule destinées à donner une forme aux pièces à produire) ont une température permettant de refroidir le plastique fondu injecté et de le solidifier. Durant le refroidissement des pièces, la vis sans fin translate vers la trémie pour se charger en granules de plastique et se préparer pour la prochaine injection. Après un délai prédéterminé laissant aux pièces le temps de se solidifier, le moule s'ouvre. Une fois le moule ouvert, les éjecteurs sortent pour extraire les pièces moulées ou les décoller afin de faciliter leur extraction par un robot. Une fois les pièces extraites, le mécanisme de fermeture génère le mouvement de fermeture du plateau mobile : la partie mobile du moule se rabat sur sa partie fixe, c'est la fermeture du moule. Le moule fermé est donc prêt à recevoir l'injection de plastique fondu. Le cycle reprend (cf. figure 1.3).

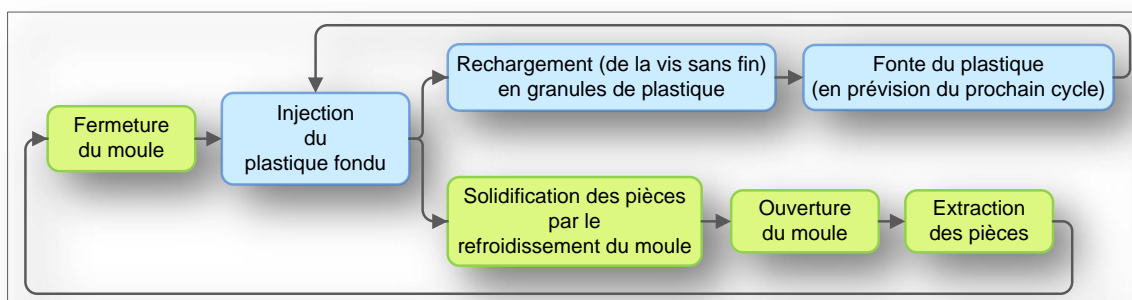


Figure 1.3 : Cycle de production d'une presse à injection de plastique

Par ailleurs, l'étude porte sur les petites et grandes presses de ce type. Sont considérées « grandes », les presses où un individu peut se tenir entre le protecteur de la zone du moule du côté opérateur et le moule [17] (le protecteur de la zone du moule est aussi appelé protecteur de l'opérateur). La « zone du moule » désigne l'espace entre les parties

mobile et fixe du moule. Une grande presse est plus dangereuse qu'une petite, car un travailleur peut pénétrer entièrement et plus facilement dans la zone du moule. Les parties vitales du corps sont donc plus exposées (ex. : tête, thorax), ce qui signifie que la gravité du dommage est plus importante. Ceci revient à dire que le risque est plus élevé. En effet, comme expliqué dans la section suivante qui traite de l'identification des risques, la gravité est une des composantes du risque.

1.3 Identification du risque

L'identification du risque fait partie de la première étape du processus de gestion du risque : l'appréciation du risque [18, 19]. Qu'est-ce que le risque ? Il n'y a pas de définition universelle du risque [20]. Dans la littérature, nous observons que selon le domaine d'étude, le concept du risque et les termes employés pour le décrire changent. En sécurité des machines, la norme ISO 12100 définit le risque comme la « combinaison de la probabilité d'un dommage et de la gravité de ce dommage » [19]. D'après cette norme, le risque comporte 4 composantes :

1. la **gravité du dommage** (« blessure physique ou atteinte à la santé » [19]) ;
2. la **fréquence ou la durée d'exposition au phénomène dangereux** (« source potentielle de dommage » [19], peut être d'origines diverses, telles que : mécanique, électrique, thermique, chimique, ergonomique, radioactive) ;
3. la **probabilité d'occurrence de l'événement dangereux** (événement (ex. : démarrage intempestif d'un élément mobile d'une machine) pouvant survenir à court ou à long terme et capable d'engendrer un dommage [19]) ;
4. la **possibilité d'éviter ou de limiter le dommage**.

Ainsi, pour réduire le risque, il faut agir sur au moins une de ces composantes [19, 21] :

- limiter la gravité du dommage ;
- réduire la fréquence ou la durée d'exposition au phénomène dangereux (voire supprimer l'exposition au phénomène dangereux) ;
- réduire ou éliminer la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux ;

- augmenter la possibilité d'évitement afin d'empêcher le dommage.

Le vocabulaire concernant la notion de risque étant établi, nous pourrions comprendre plus facilement les risques liés aux presses à injection de plastique horizontales et leurs équipements périphériques.

1.3.1 Les presses à injection de plastique horizontales et leurs risques

Les travailleurs intervenant sur les presses à injection de plastique horizontales sont exposés à des risques d'accidents graves. Plusieurs aboutissent à des amputations [7], mais ils peuvent être mortels, comme le montrent des rapports d'accident de la CSST [22, 23, 24]. D'après Beauchamp et al. [7], les risques d'accidents sur ces presses sont majoritairement liés aux mouvements inopinés des éléments de l'unité de fermeture, aux mouvements de l'unité d'injection, à l'existence de nombreux points d'écrasement et de cisaillement, aux courants électriques, aux colliers chauffants et aux matières chaudes pouvant couler ou être projetées dans toutes les directions.

Les principales zones dangereuses sur ces presses sont :

- la zone du moule (cf. n° 1, figure 1.4) ;
- la zone du mécanisme de fermeture (cf. n° 2, figure 1.4) ;
- la zone de la buse (cf. n° 4, figure 1.4) ;
- la zone de l'unité de plastification et/ou d'injection (cf. n° 4, 5.1 et 5.2, figure 1.4) ;
- la zone de l'ouverture d'alimentation (cf. n° 5.1, figure 1.4) ;
- la zone des colliers chauffants sur les cylindres de plastification et d'injection (cf. n° 5.2, figure 1.4) ;
- la zone de l'ouverture d'évacuation des pièces produites (cf. n° 6, figure 1.4) [25].

Selon le RSST du Québec [26], le terme « zone dangereuse » désigne « toute zone située à l'intérieur ou autour d'une machine et qui présente un risque pour la santé, la sécurité ou l'intégrité physique des travailleurs. »

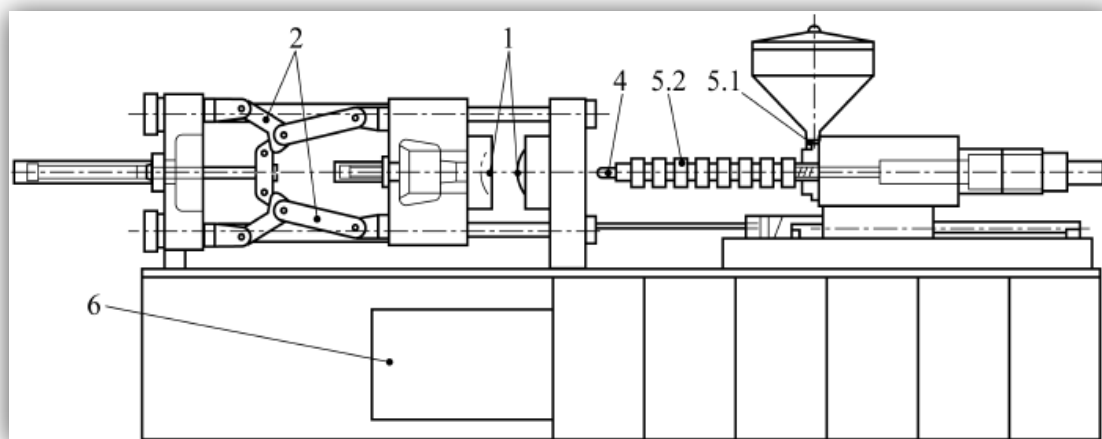


Figure 1.4 : Principales zones dangereuses d'une presse à injection de plastique horizontale [25]

L'annexe 1 dresse la liste des phénomènes dangereux d'origine mécanique et thermique, ainsi que les dommages associés à ces presses. En plus de ces phénomènes dangereux directement liés aux machines, nous en retrouvons d'autres de nature différente. Il s'agit de risques liés au lieu de travail, tels que : chutes possibles dues à des fuites d'huile ou à un encombrement du lieu [7]. Il existe également « des risques ergonomiques liés à la manutention de pièces lourdes et à des postures de travail inadéquates (surtout durant l'ajustement et l'entretien de la presse) » [7].

Lors du changement de moule et de la récupération de pièces, Tolinski [27] affirme que les opérateurs peuvent être victimes d'écrasement, d'amputation de mains, par la fermeture intempestive du moule due à la défaillance ou à l'absence de dispositifs de verrouillage (système de commande lacunaire). Pour pallier ce problème, il est bon de transmettre aux travailleurs des notions sur les risques liés au processus de moulage et les moyens de réduction du risque à utiliser (ex. : cadenassage, protecteurs, dispositifs de sécurité). Il présume que le fait que l'industrie du plastique soit un secteur où la compétition en production est très forte explique l'oubli, par certains, de l'application des bonnes pratiques en sécurité. Pour minimiser les accidents sur ces presses, certains employeurs corrigent les mesures de protection déficientes, d'autres préfèrent écarter le travailleur de la zone de fermeture du moule en remplaçant l'opérateur par un robot

récupérant les pièces. Cette substitution est avantageuse pour le travailleur « soumis au rythme de production de la presse qui n'est pas nécessairement adaptée à ses capacités » [7]. Cependant, cet isolement protège l'opérateur des risques de la machine seulement lors du moulage des pièces. Lors de l'alimentation de la machine par exemple, l'interaction entre le robot et l'opérateur peut être nécessaire. L'auteur précise que pour une telle interaction, en plus d'appliquer le cadenassage et de se fier aux dispositifs de verrouillage, la sécurité de l'opérateur peut être optimisée en rajoutant des dispositifs de protection (ex. : tapis sensibles), car l'interaction avec le robot n'est pas sans risque.

1.3.2 Les équipements périphériques et leurs risques

Dobraczynski et Chatain [16] catégorisent en trois les équipements périphériques d'une presse à injection de plastique :

- **matériel de robotique**, conçu pour le chargement et le déchargement des moules ;
- **matériel de traitement des pièces injectées** : dispositifs de décarottage, de triage pièce-carotte, de comptage et de stockage automatique, convoyeurs et tapis transporteurs... ;
- **matériel de montage, connexion, démontage et stockage des moules.**

Ils avancent que le désir d'accroître la productivité et les exigences de qualité expliquent le choix du matériel robotique et du matériel de traitement des pièces. D'après eux, les robots-manipulateurs peuvent être pendulaires ou se déplacer sur rail. Selon leur nature, ils accèdent à la zone du moule latéralement ou par le dessus. Ces robots peuvent être pourvus de pinces à mâchoires articulées afin d'extraire les carottes, ou peuvent comporter des ventouses servant à extraire les pièces produites. Ils peuvent également être destinés à trier les pièces et les carottes, à acheminer directement les carottes dans un granulateur afin de récupérer le plastique et le réutiliser lors d'un processus futur d'injection de plastique. Les pièces peuvent être déposées sur un convoyeur qui les déverse dans des contenants.

À propos de ces robots, nous pouvons déjà noter trois phénomènes dangereux :

1. les mouvements du robot selon les coordonnées polaires (si pendulaire) ou cartésiennes (si sur rail) ;
2. le risque de pincement si c'est un robot extrayant des carottes ;
3. le risque d'être « aspiré » partiellement si c'est un robot extrayant des pièces produites.

Par ailleurs, les mouvements du robot, synchronisés avec ceux du moule, sont très rapides pour optimiser la durée du cycle d'injection. Le bras du robot doit quitter la zone du moule avant la fermeture de celui-ci. Le type de pièces à produire dicte les caractéristiques requises des préhenseurs du robot (ex. : type, dimensions). La gestion des dispositifs servant à manipuler et à transporter les pièces peut être assurée par un « ensemble de commande vidéo construit autour d'un microordinateur » [16].

Quant à l'utilisation du matériel de montage, de connexion, de démontage et de stockage des moules, elle se justifie par le besoin de minimiser le temps de démarrage de la production [16]. En effet, ce genre de matériel facilite et accélère la manutention et l'installation du moule sur les plateaux fixe et mobile de la presse. Par exemple, il existe des dispositifs de bridage rapide de moules afin de fixer le moule sur les plateaux. Des chariots équipés d'un plateau à rouleaux peuvent être utilisés pour déplacer et transporter le moule ; il s'agit de chariots ajustables à la hauteur de la presse. Pour les moules plus lourds, un palan muni d'un crochet peut être utilisé. Le palan, comme le pont-roulant, sont des appareils de levage pouvant servir à manutentionner les moules. Malheureusement, ces appareils peuvent être à l'origine de coincement ou de heurt du travailleur par la charge manutentionnée [5]. D'après Marinatchi et Arsenault, les accidents graves et mortels liés à l'utilisation de palans ou de pont roulants sont souvent liés, entre autres, à une surcharge des élingues et de l'appareil de levage, un usage inapproprié de l'appareil de levage, son mauvais état, la proximité des travailleurs durant les manœuvres [5].

À propos des convoyeurs d'évacuation de pièces, leur présence génère des risques. Par exemple, les convoyeurs à courroie occasionnent des risques de : coincement,

écrasement ou enroulement dans un angle rentrant d'un rouleau porteur, d'un tambour d'entraînement ou d'un tambour tendeur [28].

Globalement, d'après la norme *NF EN 201* [25], les équipements périphériques peuvent créer des phénomènes dangereux auxquels il faut remédier :

- éléments en mouvement accessibles à cause de modifications apportées aux moyens de protection initiaux pour faciliter l'intégration ou l'enlèvement d'un équipement périphérique ;
- parties en mouvement accessibles d'un équipement périphérique ;
- visibilité altérée de la presse par l'ajout d'un équipement périphérique ;
- zones d'intervention devenues inaccessibles sur la presse, par l'ajout d'un équipement périphérique.

Les risques liés aux presses et leurs équipements périphériques connus, passons maintenant à des exemples d'accidents illustrant des dommages générés par plusieurs de ces risques.

1.3.3 Interventions dans la zone du moule : exemples d'accidents

Le tableau 1.1 présente une liste d'accidents survenus à des travailleurs alors qu'ils exécutaient une tâche. Ces accidents, détaillés à l'annexe 3, impliquent la zone du moule ou un équipement périphérique. En plus de porter atteinte à l'intégrité ou la santé des travailleurs concernés, ils engendrent également une hausse des primes d'assurance d'employeurs auprès de la société d'indemnisation et des débours (ex. : débours de la CSST à l'annexe 2).

Tableau 1.1 : Exemples d'accidents du travail liés à des presses ou leurs équipements périphériques

Pays	Accident	Causes	Tâche
France [15] (date inconnue)	Écrasement d'un pouce par la fermeture du moule	Démarrage intempestif du plateau mobile	Extraction d'une carotte
France [15] (date inconnue)	Écrasement d'un bras par un carrousel	Neutralisation du dispositif de sécurité du carrousel	Déblocage du carrousel
Canada (Ontario) [22] (14 avril 1993)	Coincement mortel de la tête et des épaules par la fermeture du moule	Commandes non verrouillées Installation lacunaire d'un contact de fin de course	Intervention dans la zone du moule, en mode automatique
Canada (Québec) [29] (5 janvier 1995)	Écrasement de trois doigts dans un moule	Méthode de travail non sécuritaire due à la forte compétition dans le secteur de la plasturgie	Lubrification d'une composante de moule
Canada (Québec) [23] (8 mai 2003)	Coincement mortel du bassin entre le moule et un carrousel	Démarrage intempestif de l'appareil de levage Cadenassage non appliqué Station d'entretien du moule non opérationnelle Zone dangereuse non visible de la presse depuis son bouton de réarmement	Changements et ajustements de moule
Canada (Québec) [30] (2 juin 2006)	Main droite amputée par la fermeture du moule	Système de sécurité lacunaire et facilement contournable Gestion déficiente de la SST	Débouillage du moule
Canada (Québec) [24] (12 juillet 2006)	Mortellement écrasé par la fermeture du moule	Méthode de travail dangereuse Zone de fermeture du moule accessible Neutralisation des dispositifs de sécurité Gestion déficiente de la SST	Ajustements de production

Ces exemples montrent que des méthodes de travail non sécuritaires peuvent être influencées par : la réalité du secteur industriel, la neutralisation ou l'absence de moyens de protection, une conception lacunaire du système « presse-périphérique(s) » et peuvent engendrer des accidents. Le HSE [17] mentionne que la plupart des accidents sur des presses à injection de plastique sont dus à l'installation d'un moyen de protection inadéquat, à l'enlèvement ou la dégradation du moyen de protection, ou à la neutralisation du moyen de protection (cas généralement observé lors de réglages). Il sera donc intéressant de parcourir les moyens de réduction du risque disponibles pour sécuriser les presses seules et les presses ayant des équipements périphériques.

1.4 Réduction du risque

La réduction du risque est la deuxième étape du processus de gestion du risque [18, 19]. Pour réduire les risques associés à une machine, il faut comprendre le processus d'aboutissement à un accident sur cette machine (c.-à-d., ses causes possibles). La CSST et l'IRSST [18] proposent une description du processus accidentel basée sur les quatre composantes du risque mentionnées à la section 1.3. Inspirée de cette description, la figure 1.5 schématise le processus accidentel sous forme d'arbre des causes sommaire. Cette figure indique qu'un événement dangereux survenant alors qu'un individu se trouve en contact ou s'expose à un phénomène dangereux, ne cause pas nécessairement d'accident, mais plutôt un incident. Un accident survient si et seulement si l'individu n'a pu éviter l'effet de l'événement dangereux : le dommage. C'est en connaissant les causes d'un incident ou d'un accident qu'on comprend sur quelles composantes agir afin de réduire le risque.

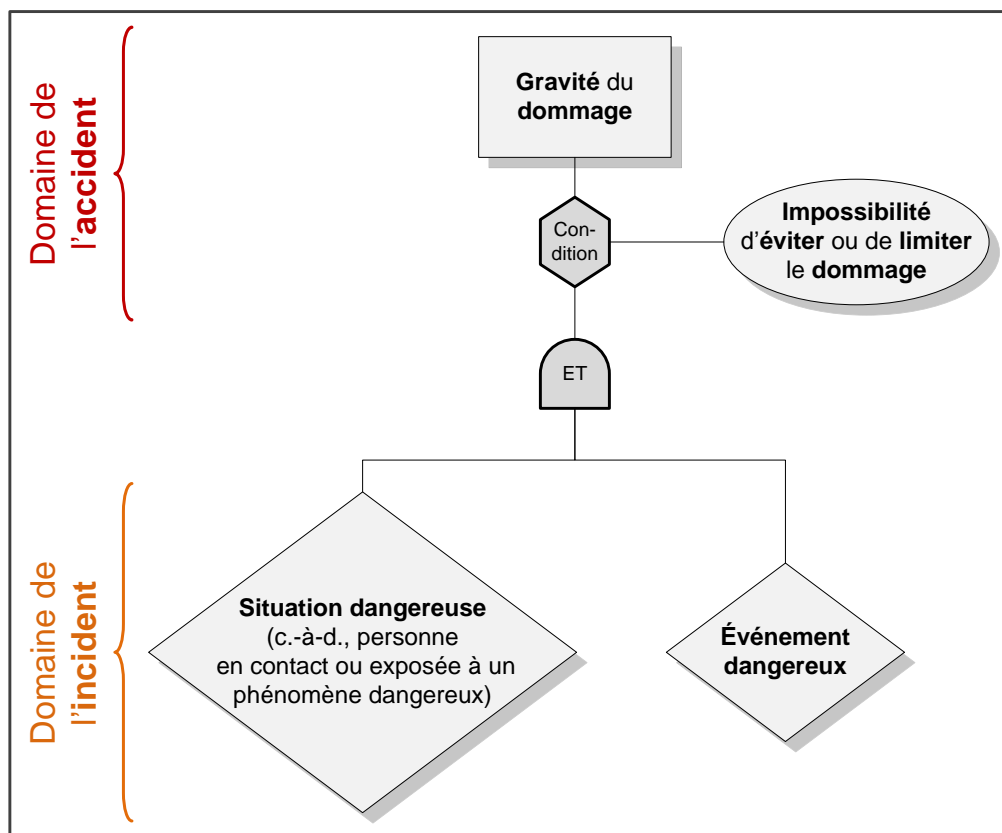


Figure 1.5 : Arbre des causes sommaire illustrant le processus accidentel


L'arbre est sommaire, car d'autres causes, directes ou indirectes [31, 5], de l'accident existent et peuvent le ramifier en précisant la situation dangereuse, l'événement dangereux et l'impossibilité d'éviter ou de limiter le dommage. Ces causes proviennent de la perturbation d'au moins un des paramètres caractérisant la situation de travail :

1. le **M**oment où s'exécute la tâche demandée ;
2. l'**É**quipement (ou matériel) sur lequel s'effectue le travail ;
3. le **L**ieu du travail ;
4. l'**I**ndividu (travailleur) mettant en œuvre ses activités pour répondre à la tâche grâce à sa formation, ses capacités, son expérience ;
5. la **T**âche exécutée ;
6. l'**O**rganisation gérant le travail effectué et la SST [31, 5, 32].

La situation de travail est « l'ensemble des éléments qui interagissent avec les individus au cours de leur travail » [5]. Ces six paramètres, réunis sous le nom du concept « MÉLITO », sont souvent scrutés lors des enquêtes et analyses d'accidents, pour comprendre les causes d'un accident ou d'un incident et y remédier (trouver des moyens pour réduire le risque). Pérusse [33], lui, considère cinq de ces six paramètres : il exclut le moment. Dans notre cas, nous adoptons le « MÉLITO », car il est plus complet. En effet, comme nous le verrons plus loin, le moment où se produit l'accident peut contribuer à ce dernier.

L'outil [18] de la CSST et de l'IRSST suggère une hiérarchie de réduction du risque inspirée de la norme *ISO 14121-2:2007* [34] et de l'ancienne norme *ISO 12100-1:2003* [35]. Cette dernière, ainsi que deux autres anciennes normes : l'*ISO 12100-2:2003* [36] et l'*ISO 14121-1:2007* [37], sont maintenant fusionnées en la nouvelle norme : *ISO 12100:2010* [19]. La hiérarchie présentée dans ces deux sources permet de classer au tableau 1.2, les types de moyens de réduction du risque et leurs impacts sur des composantes du risque.

Tableau 1.2 : Efficacité des types de moyens de réduction du risque

	Types de moyens de réduction du risque	Effets possibles sur une composante du risque	Exemples de moyens de réduction du risque
<div> <div>+</div> <div>Efficacité</div> <div>—</div> </div>	Prévention intrinsèque	<ul style="list-style-type: none"> - Élimine ou ↓ le phénomène dangereux - ↓ la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux - ↓ la gravité du dommage - ↑ la possibilité d'évitement 	<ul style="list-style-type: none"> - Moulage à froid : élimine le risque de brûlure au niveau du moule. - Conception sécuritaire de système de commande : réduit la probabilité d'occurrence d'un démarrage intempestif. - Vitesse réduite d'un robot : augmente la possibilité d'éviter des heurts par le robot.
	Protecteurs / Dispositifs de protection	<ul style="list-style-type: none"> - ↓ la fréquence ou la durée d'exposition au phénomène dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> - Traverser un barrage immatériel fonctionnel arrête un phénomène dangereux.
	Avertissement, signalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Limite la gravité du dommage - ↑ la possibilité d'évitement 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce symbole :  [38] rappelle de faire attention aux angles rentrants.
	Méthodes de travail	<ul style="list-style-type: none"> - ↓ la durée d'exposition au phénomène dangereux - ↑ la possibilité d'évitement 	<ul style="list-style-type: none"> - Appliquer le cadenassage à une source d'énergie générant un phénomène dangereux ↓ la durée d'exposition à celui-ci.
	EPI	<ul style="list-style-type: none"> - Limite la gravité du dommage - ↑ la possibilité d'évitement 	<ul style="list-style-type: none"> - Porter des souliers de sécurité permet d'éviter ou de limiter un écrasement du pied par la chute d'un outil ou équipement lourd.
	Formation, information	<ul style="list-style-type: none"> - Limite la gravité du dommage - ↓ la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> - La formation peut permettre aux travailleurs d'éviter de fausses manœuvres, d'anticiper des situations dangereuses.

1.4.1 Presse à injection de plastique horizontale seule : moyens de réduction du risque

1.4.1.1 Moyens de protection de la presse

Des moyens de réduction du risque, dont des moyens de protection (c.-à-d., protecteurs et dispositifs de protection) sont prescrits dans la norme américaine *ANSI/SPI B151.1-2007* [39] et la norme européenne *NF EN 201:2009* [25]. La première est dédiée au concepteur et à l'utilisateur de la presse, tandis que la deuxième est dédiée uniquement au concepteur. Les protecteurs, qu'ils soient fixes ou mobiles (verrouillés ou interverrouillés), doivent être installés de manière à rendre inaccessible toute zone dangereuse de la presse [40]. Le tableau 1.3 présente les types de moyens de protection, par zone dangereuse, que proposent ces deux normes.

Légende :

- F :** protecteur **F**ixe
- MV :** protecteur **M**obile avec dispositif de **V**errouillage
- MI :** protecteur **M**obile avec dispositif d'**I**nterverrouillage
- BM :** dispositif de **B**locage **M**écanique du plateau mobile (ce « verrou mécanique » [12] protège contre la fermeture accidentelle du moule)
- DES :** Dispositif **É**lectro-**S**ensible
- RL :** **R**ideaux **L**umineux

Tableau 1.3 : Moyens de protection suggérés par les normes *ANSI/SPI B151.1-2007* et *NF EN 201:2009*

Zone dangereuse	Moyens de protection	
	EN [26]	ANSI [35]
Zone du moule (entre les plateaux fixe et mobile)	MV ou MI, BM	<ul style="list-style-type: none"> - Protecteur de l'opérateur (MV) - Protecteur du côté opposé à l'opérateur (MV) - BM - DES et RL pour les grandes presses
Zone au-dessus du moule	MV ou F	Protecteur de dessus (MV ou F)
Zone de mouvement des mécanismes des noyaux et éjecteurs	F ou MV ou RL	Protecteur de dessus (MV ou F)
Zone du mécanisme de fermeture	MV ou F (si accès requis que pour la maintenance ou la réparation)	F ou MV
Zone de l'ouverture d'évacuation	F ou MV ou DES	F ou M
Zone de la buse	MV ou combinaison : F et MV	<ul style="list-style-type: none"> - Protecteur de purge non perforé (MV) - Couverture isolante sur le baril d'injection (contre les brûlures cutanées)

Le tableau 1.3 montre que les deux normes acceptent la plupart du temps les mêmes types de protecteurs par zone dangereuse. Contrairement à la *NF EN 201:2009*, l'*ANSI/SPI B151.1 – 2007* précise le nom du protecteur à installer ; ce qui permet de visualiser son emplacement sur la presse. De même, l'outil du HSE [17] sur la sécurité des presses à injection conseille des moyens de protection (similaires à ceux proposés dans l'une ou l'autre de ces deux normes) pour les mêmes zones dangereuses. Pour les

grandes presses, l'outil [17] recommande d'ajouter un dispositif détecteur de présence (ex. : tapis sensible) entre les parties fixe et mobile du moule. Les numéros de la figure 1.6 réfèrent aux protecteurs par zone dangereuse :

1. Protecteur au bout du mécanisme de fermeture (section A-A)
2. Protecteur du mécanisme de fermeture
3. Protecteur de la zone du moule (côté de l'opérateur de production)
4. Protecteur opposé à l'opérateur de production
5. Protecteur de dessus
6. Protecteur au bout de la zone du moule (section B-B)
7. Protecteur anti-éclaboussure de la buse
8. Protecteur du baril d'injection
9. Carter de la goulotte d'alimentation
10. Protecteur d'accouplement de la vis
11. Protecteur sous le mécanisme de fermeture
12. Protecteur (ou convoyeur ou trémie) de la décharge des pièces [12].

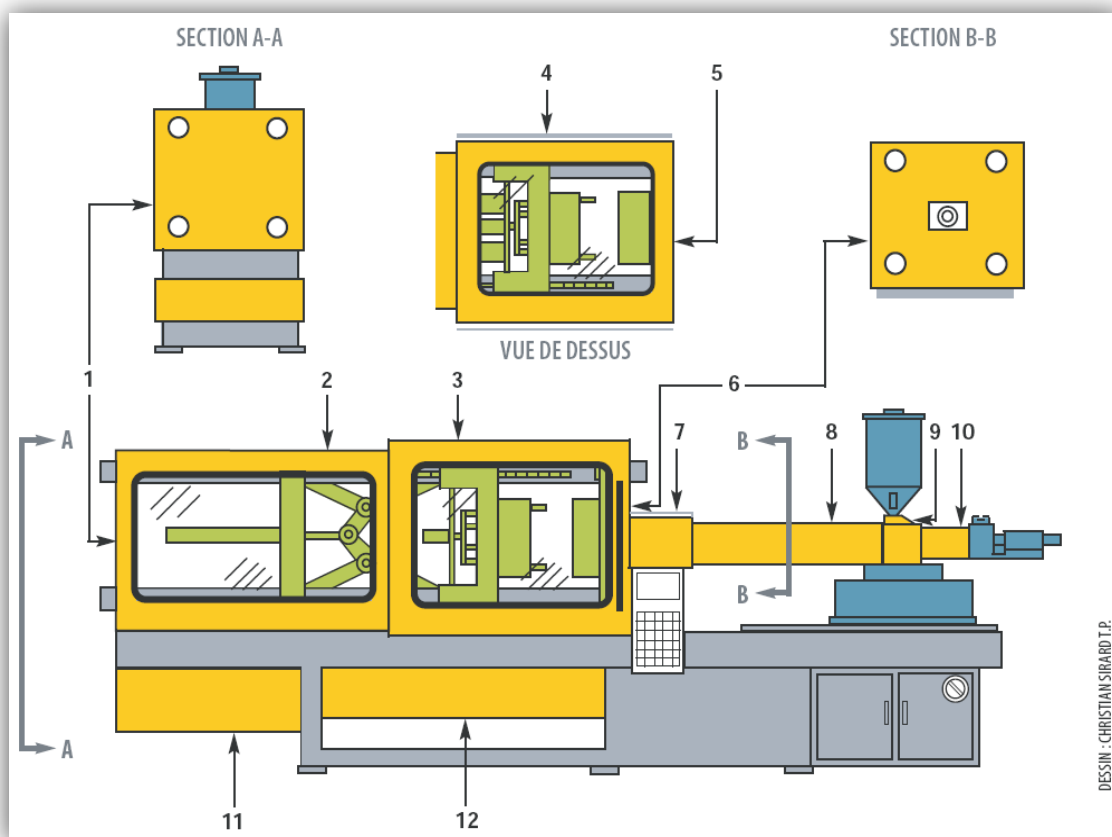


Figure 1.6 : Protecteurs d'une presse injection de plastique horizontale [12]

Un dispositif de verrouillage ou d'interverrouillage peut être associé à chacun de ces protecteurs.

1.4.1.2 Fonctions de sécurité de la presse et prévention intrinsèque du système de commande relatif à la sécurité

À ce dispositif de verrouillage ou d'interverrouillage, une fonction de sécurité (FS) est attribuée. Cette FS peut consister à arrêter ou inverser instantanément un ou plusieurs mouvements dangereux à l'ouverture d'un des protecteurs. S'il s'agit d'un dispositif de verrouillage, l'arrêt sera instantané une fois l'ouverture du protecteur entamée (pour les protecteurs verrouillés, le temps d'arrêt du phénomène dangereux doit être inférieur au temps d'accès du travailleur à la zone dangereuse). Dans le cas où le temps d'arrêt du phénomène dangereux est supérieur ou égal au temps d'accès, on utilise un dispositif d'interverrouillage. En effet, ce dernier n'autorisera l'ouverture du protecteur qu'une fois le phénomène dangereux disparu. Ces FS sont traitées par le système de commande de la presse si elle est utilisée seule. Elles peuvent aussi être traitées par le système de commande que partagent la presse et ses équipements périphériques. Il arrive que les FS soient traitées par des composants de sécurité, des composants dédiés⁵ à la sécurité ou des composants standard. Cependant, l'IFA [41] maintient que l'utilisation de composants non dédiés à la sécurité est à écarter lorsqu'il s'agit de sous-systèmes complexes, tels qu'un API standard, utilisés pour réduire des risques moyens ou élevés et dont les chaînes de redondance sont identiques. Il faut exclure ce genre de sous-système puisqu'ils sont incapables de réagir suffisamment face à la détection de défauts (défauts cachés pouvant remonter à la conception) [41]. Pour toutes ces raisons et dans pareil cas, l'IFA [41] recommande d'utiliser des APIdS. Ces derniers offrent souvent de l'assistance à l'utilisateur (pour éviter des erreurs ou échec de compilation) lorsqu'il doit

⁵ « « dédié » signifie qu'il faut encore fournir une contribution extrinsèque pour franchir la marche amenant l'APIdS au même niveau qu'un composant de sécurité » [42]. Comparé à un API, un APIdS est plus fiable : son risque de commande intempestive est peu probable [43].

le programmer ou le paramétrer et lui permettent d'en protéger l'accès [41]. Enfin, l'IFA [41] affirme qu'intégrer des composants de sécurité ou dédiés à la sécurité plutôt que des composants standard dans la conception d'une FS facilite l'estimation de son niveau de performance. Cette facilitation est due au fait que les composants de sécurité ou dédiés à la sécurité satisfont déjà des exigences de l'estimation du niveau de performance ; ce dernier peut même être fourni avec le composant [41]. Malheureusement, concevoir une FS avec des composants standard est plus ardu : il faut vérifier soi-même la conformité du composant standard aux exigences normatives (ici, la *NF EN ISO 13849-1:2008*). Le manque d'information sur le composant, de la part du concepteur ou du fabricant, est un facteur qui complexifie, voire rend impossible, cet exercice de vérification [41]. Ainsi, il est préférable qu'un intégrateur sécurise une presse à injection de plastique horizontale ou toute autre machine avec des composants de sécurité ou dédiés à la sécurité. Ce sera pour lui une manière d'estimer beaucoup plus facilement le niveau de performance d'une FS de sa machine et ainsi, de quantifier le niveau de réduction du risque apporté par cette FS. Comparer ce niveau de réduction du risque à l'objectif de réduction du risque permettra de savoir si des moyens de réduction du risque supplémentaires sont requis [2, 19].

De surcroît, d'après les principes de conception des circuits de commande traitant des FS, il est recommandé de séparer les fonctions de commande standard des FS [3]. Il est préférable de traiter des FS par une logique câblée plutôt qu'un APIdS : les modes de défaillances des sécurités câblées sont mieux connus que ceux des APIdS [6, 42, 44]. Contrairement à une FS, une fonction de commande standard n'est là que pour contribuer au fonctionnement de la machine en mode de production ou de réglage [3]. Quoiqu'une FS ait pour rôle d'assurer la sécurité de l'utilisateur de la machine, cette garantie (ou fiabilité) n'est pas de 100%. Cela signifie que lorsqu'un travailleur intervient dans la zone du moule en assurant sa sécurité par l'ouverture d'un des protecteurs de cette zone, le risque de fermeture intempestive du moule est quand même présent. Cependant, il est acceptable de se dire qu'on est en sécurité si la fonction d'arrêt propre à l'ouverture du protecteur est très fiable. Pour cela, il est important de s'assurer

qu'une FS fournit bien la réduction du risque requise par rapport aux phénomènes dangereux dont elle protège l'utilisateur de la machine. C'est le niveau de performance de la FS qui indique ce niveau de réduction du risque.

1.4.1.3 Mesures de prévention appliquées par l'utilisateur de la presse

Les FS, telles que les commandes maintenues ou non de vitesse réduite, peuvent être sollicitées lors de l'exécution de méthodes de travail. Au Québec, selon l'article 186 du RSST [26] :

Lorsqu'un travailleur doit accéder à la zone dangereuse d'une machine à des fins de réglage, de déblocage, de maintenance, d'apprentissage ou de réparation, incluant la détection d'anomalie de fonctionnement, et que, pour ce faire, il doit déplacer ou retirer un protecteur, ou neutraliser un dispositif de protection, la machine ne doit pouvoir être mise en marche qu'au moyen d'un mode de commande manuel ou que conformément à une procédure sécuritaire spécifiquement prévue pour permettre un tel accès. Ce mode de commande manuel ou cette procédure doit présenter les caractéristiques suivantes :

- 1° il rend inopérant, selon le cas, tout autre mode de commande ou toute autre procédure ;
- 2° il ne permet le fonctionnement des éléments dangereux de la machine que par l'intermédiaire d'un dispositif de commande nécessitant une action continue ou un dispositif de commande bimanuel ;
- 3° il ne permet le fonctionnement de ces éléments dangereux que dans des conditions de sécurité accrue, par exemple, à vitesse réduite, à effort réduit, pas à pas ou par à-coups.

Dans un même ordre d'idée, la liste de contrôle de Suvapro [40] invite également à utiliser des modes de vitesse réduite, de commande pas à pas, pour assurer la sécurité des travailleurs sur les presses à injection, lors de réglage et de maintenance. Un autre moyen pour sécuriser des interventions dans la zone du moule est de cadenasser la presse, voire les équipements dangereux situés en périphérie. Selon l'article 185 du RSST du Québec [26], le cadenassage est le moyen obligé au Québec (sous réserve de l'article 186 susmentionné) pour intervenir en zone dangereuse lors de réparation, de déblocage ou de maintenance sur une machine. Le cadenassage, méthode de travail qui s'applique selon la fiche de cadenassage, doit être encadré par une politique de gestion : le programme de cadenassage [45]. La norme CSA Z460-2005 mentionne les éléments

que doit comporter un programme de cadenassage. Cette norme donne aussi des prescriptions quant à l'application du cadenassage, à la maîtrise des énergies source de danger. Le document *Vérification du contenu d'un programme de cadenassage* [46], sans être un document de rédaction d'un tel programme, est un aide-mémoire pour améliorer un programme de cadenassage existant.

Toujours dans l'optique de sécuriser les travailleurs il faut que son poste de travail et son environnement soient propices : propres, non encombrés, niveau de bruit acceptable ou port de protecteurs auditifs si le niveau de bruit est excessif, ainsi qu'un avertissement écrit rappelant aux travailleurs de porter leurs protecteurs auditifs dans ce cas [40].

Maintenant que nous avons présenté les moyens de réduction du risque pour une presse seule, qu'en est-il des moyens de réduction du risque lorsque la presse interagit avec des équipements périphériques ?

1.4.2 Système « presse-périphérique(s) » : moyens de réduction du risque

1.4.2.1 Prévention intrinsèque et moyens de protection du système

Suvapro [40] affirme que « les dispositifs de protection sont souvent modifiés afin de pouvoir ajouter des appareils (tire-carotte par ex.) ». Le tire-carotte est le robot chargé d'enlever la carotte de la zone du moule. Dans le cas où des équipements sont ajoutés autour de la presse ou que des modifications sont apportées aux moyens de protection, les normes *ANSI/SPI B151.1-2007* [39] et *NF EN 201 : 2009* [25] se prononcent. Elles disent que l'ajout d'équipements utilisés autour de la presse ne doit aucunement altérer le niveau de sécurité que procure l'ensemble des moyens de réduction du risque initiaux de la presse. La *NF EN 201 : 2009* établit des mises en garde à propos des modifications des moyens de protection de la presse pour accueillir un équipement périphérique. Ces mises en garde concernent les cas où la presse est conçue pour être utilisée avec un équipement périphérique et le cas où le fabricant fournit un équipement périphérique pour la presse. Selon la norme, cette presse ne doit pouvoir fonctionner seulement si

l'équipement périphérique a été installé. Si celui-ci est installé sur la presse, le risque de renversement de cette dernière doit être évalué. La norme mentionne qu'après désinstallation d'un équipement périphérique, les moyens de protection originels doivent être replacés sur la presse.

Les robots périphériques

Par ailleurs, il existe une autre norme américaine : *ANSI B151.27-2003* [47] portant sur les spécifications de sécurité concernant l'intégration, l'utilisation et l'entretien de robots intervenant dans la zone du moule des presses à injection de plastique. La norme établit les responsabilités à l'égard de l'employeur et de l'intégrateur. Selon cette norme, l'intégrateur devrait être l'employeur, à moins qu'un contractant accepte de prendre les responsabilités de l'intégration. Ce dernier doit s'assurer de la conception et de l'assemblage du robot. La norme suggère des pratiques sécuritaires pour l'intégration, la maintenance et l'utilisation de ces robots :

Elle demande qu'une inspection visuelle du système « presse - robot » soit faite avant toute intervention sur la machine ; cela permet de constater si le système est endommagé et de s'assurer du bon fonctionnement de la fonction d'arrêt d'urgence par exemple. Elle exige que l'intervenant dans la machine ait la maîtrise du système « presse - robot » afin d'éviter d'être victime d'un démarrage par un tiers. Pour cela, l'application, entre autres, des notions d'ergonomie dans la conception des machines est primordiale [48, 23]. De plus, le démarrage du robot doit toujours être volontaire, notamment après l'emplacement d'un moyen de protection ou la perte d'alimentation en énergie. En cas de modification de moyens de protection, la nouvelle protection doit empêcher l'accès à la zone dangereuse tout comme les moyens de protection initiaux. Chaque poste de commande du système « presse - robot » doit comporter un dispositif d'arrêt d'urgence facilement accessible et utilisé uniquement à des fins d'arrêt d'urgence. L'arrêt d'urgence doit être prioritaire sur toute commande. L'actionnement de tout dispositif d'arrêt d'urgence doit commander l'arrêt de tout le système : la presse, le robot et tous les autres équipements périphériques sources de danger associés à la presse. Le système « presse - robot » doit avoir au moins un moyen de coupure générale d'alimentation en

énergie. Ce moyen de coupure doit se trouver à l'extérieur des zones dangereuses du système et doit être cadenassable. Tout comme pour la presse, Suvapro [40] recommande que le robot possède des modes de vitesse réduite et de commande pas à pas lors du réglage et de la maintenance. De plus, Suvapro [40] recommande un capot de protection sur les petits robots de manutention interagissant avec la presse. Cependant, il prescrit une enceinte de protection contre la zone de travail des grands robots de ce genre. Les portes de l'enceinte doivent être électriquement surveillées. Si l'enceinte comprend des ouvertures, celles-ci ne doivent pas permettre d'atteindre une zone dangereuse. Si le travailleur doit pénétrer dans l'enceinte, la mise à l'arrêt des équipements périphériques qui s'y trouvent doit être sûre, leurs dispositifs de protection, exempts de défaut et de contournement.

Autres équipements périphériques

D'autres équipements, sont situés autour de la presse et peuvent contribuer à un accident dans la zone du moule. C'est le cas des convoyeurs, des escaliers auxiliaires et des estrades de travail fixes ou mobiles. Au sujet des risques inhérents aux convoyeurs à courroie par exemple, Giraud et al [28] proposent, entre autres, d'utiliser des protecteurs fixes adéquats (ex.: protecteur fixe d'angle rentrant). Suvapro [40] conseille de monter des garde-corps adéquats sur les bords des escaliers ou estrades pour éviter les chutes.

1.4.2.2 Mesures de prévention appliquées par l'utilisateur du système

Il est important que le travailleur qui intervient sur le système « presse – périphérique(s) » pour faire de l'inspection, de la maintenance, de la production, du réglage ou autre, soit formé et compétent pour accomplir sa tâche [40]. L'employeur a pour devoir de mettre, en tout temps, à la disposition du travailleur les notices d'instruction et de maintenance, et les équipements de protection individuelle (EPI) requis pour l'activité qu'il entreprend [40]. Ces EPI peuvent être des protecteurs auditifs ou oculaires, des chaussures de sécurité ou des gants de protection [40]. Le travailleur doit à son tour respecter ces notices d'instruction et de maintenance et porter ces EPI.

De plus, d'après le HSE [17], des mesures de prévention doivent être prises lors de l'opération de la presse, de la maintenance et du changement de moule. Pour s'assurer de la sécurité lors de l'opération de la presse, tous les protecteurs doivent être remis à leur place et offrir une protection adéquate. Vérifier le bon fonctionnement des moyens de protection est primordial. Par exemple, ouvrir ou enlever tel protecteur avec dispositif de verrouillage doit empêcher le mouvement de fermeture du plateau mobile. C'est ce que propose également l'outil de l'IRSST sur la sécurité des presses à injection de plastique horizontales [12]. Contrairement à cet outil qui recommande de vérifier les moyens de protection de la presse avant chaque intervention, l'outil du HSE suggère d'entreprendre ces vérifications quotidiennement, de même après un changement de moule. La suggestion du HSE conviendrait davantage aux opérateurs de la presse, puisqu'elle est moins contraignante que celle de l'IRSST qui reste néanmoins plus sécuritaire.

Pour sécuriser les interventions de maintenance, le HSE [17] recommande des vérifications mensuelles. Dans ce cas, les vérifications des moyens de protection et des dispositifs de sécurité (ex. : arrêt d'urgence) sont plus exhaustives que celles pour l'opération de la presse. Ces recommandations du HSE pour l'opération et la maintenance proviennent du fait qu'un nombre important d'accidents est dû à la détérioration ou à l'enlèvement de dispositifs de protection fournis avec la presse.

Pour sécuriser les interventions de changement de moule, le HSE [17] suggère des mesures de prévention à appliquer avant, pendant et après l'intervention. Par exemple, avant de débiter un changement de moule, il faut désengager l'unité d'injection du moule ; il faut isoler le mécanisme de mouvement des noyaux ou des éjecteurs avant d'y accéder ; l'appareil de levage utilisé pour l'enlèvement et l'installation du moule doit être adéquat. Une grille de l'ASFETM [49] rappelle les points à vérifier sur un palan ou un pont roulant. Un guide de l'ASPHME [5], plus détaillé que la grille précédente, propose des mesures de sécurité à appliquer pour prévenir les accidents liés aux appareils de levage. Ces deux documents outillent les employeurs et travailleurs afin de sécuriser l'utilisation de ces appareils, étant donné que le RSST exige que tout appareil

de levage soit « utilisé, entretenu et réparé de manière à ce que son emploi ne compromette pas la santé, la sécurité ou l'intégrité physique des travailleurs » [26]. Durant le changement de moule, deux méthodes de travail sont possibles :

- 1) **Changer le moule en utilisant les protecteurs et dispositifs de verrouillage installés.** Le HSE [17] préfère cette méthode. Il suggère de vérifier que le mécanisme de mouvement des noyaux et des éjecteurs reste immobile lorsque le protecteur de l'opérateur est ouvert. S'il faut intervenir dans une zone dangereuse pourvue de moyens de protection, toute partie de la machine doit être immobilisée par l'actionnement de l'arrêt d'urgence, même si les protecteurs et dispositifs de verrouillage fonctionnent. Si, durant le changement de moule, aucun mouvement de la machine n'est requis et ce, pour une durée prolongée, il propose le cadenassage.
- 2) **Changer le moule sans utiliser de protecteurs, ni de dispositifs de verrouillage.** Le HSE [17] conseille d'appliquer cette méthode seulement si on ne peut procéder autrement. Dans pareil cas, il demande de cadenasser la presse.

De son côté, la CNA [50], propose une procédure en onze étapes pour le montage de moule : 1) rassembler les parties fixes et mobiles du moule à l'aide d'outils de fixation (ex. : bride) si non munies d'un dispositif de guidage (cette étape se fait à l'extérieur de la presse), 2) accrocher ces deux compartiments réunis à l'appareil de levage, 3) déplacer le moule et le positionner contre l'organe de centrage du plateau fixe, 4) fixer le moule sur le plateau fixe, 5) désengager les crochets et élingues de l'appareil de levage, 6) fermer le protecteur (comme ce n'est pas précisé, nous présumons qu'il s'agit du côté de l'opérateur d'après les visites en usines (cf. chapitre 2)), 7) translater le plateau mobile jusqu'au moule (mouvement de fermeture), 8) ouvrir le protecteur, 9) fixer le moule sur le plateau mobile, 10) enlever les outils de fixation qui réunissaient les compartiments du moule, 11) procéder aux ajustements de la machine. Après un changement de moule, il est recommandé de vérifier le bon fonctionnement des moyens de protection installés en effectuant les mêmes vérifications que suggère le HSE pour la maintenance [17]. Le HSE [17] prend soin de souligner que ces vérifications succédant à

un changement de moule n'exemptent pas un travailleur de vérifier le bon fonctionnement des moyens de protection avant d'opérer la presse.

En résumé, si la presse est utilisée sans périphériques, elle devrait comporter les moyens de protection de la figure 1.6. Si elle est utilisée avec périphériques, les modifications apportées aux moyens de protection initiaux doivent fournir une sécurité équivalente à celle précédant l'installation du (des) périphérique(s). Les moyens de protection doivent rendre inaccessibles les zones dangereuses du système. Les mesures de sécurité prescrites par l'ANSI pour les robots intervenant dans la zone du moule sont valables pour les autres équipements périphériques représentant un risque pour le travailleur lors de ses interventions dans la zone du moule. D'autres moyens de réduction du risque permettent de gérer la sécurité des travailleurs dans la zone du moule. Il s'agit d'avertissements ou de consignes de sécurité claires, de méthodes de travail sécuritaires (ex. : cadenassage ou utilisation de vitesse réduite), d'un poste de travail entretenu, du port des EPI prescrits, de l'acquisition d'une formation adéquate et de compétences.

1.5 Réflexion sur la littérature et choix pour l'étude

Somme toute, les documents de la revue de littérature renseignent sur :

- les phénomènes dangereux et dommages liés : aux presses elles-mêmes, aux équipements périphériques eux-mêmes et à l'impact dangereux des équipements périphériques sur l'utilisateur de la presse ;
- les prescriptions pour la conception ou l'utilisation de moyens de réduction du risque couvrant tous les niveaux hiérarchiques du processus de réduction du risque.

Cependant, ces risques répertoriés ne sont pas toujours associés à un contexte (c.-à-d. la tâche réalisée). Si le contexte est mentionné, la description du risque gravite toujours autour de la presse ou de l'équipement périphérique. Néanmoins, lors d'une intervention sur une machine, on ne s'expose pas uniquement aux risques générés par cette machine, mais également aux risques provenant des autres éléments de la situation de travail propre à l'intervention. Alors, pour réduire les risques liés aux interventions

de maintenance et de production sur les presses à injection de plastique horizontales, s'attaquer aux risques liés aux presses et leurs équipements périphériques ne suffit pas. Il faut aussi s'attaquer aux risques générés par les autres éléments de la situation de travail. Les exemples d'accidents présentés plus tôt en témoignent : une méthode de travail non sécuritaire imposée par l'employeur, une organisation déficiente du travail sont des causes relatées dans les rapports de ces accidents. Or, ces causes, ne se rattachent à aucune machine. Elles sont d'ordre organisationnel.

Dans la littérature présentée, le rapport de recherche de Chinniah et al. [6] se distingue : il s'agit d'un rapport pratique inventoriant non seulement les phénomènes dangereux et dommages liés à une presse à injection de plastique horizontale, mais aussi les autres composantes du risque inhérent à une presse : situation dangereuse et événement dangereux. De plus, le contexte d'identification des risques y est précisé : l'opération de la presse et le changement de moule. Les points forts et faibles des moyens de protection de la presse y sont soulevés. Le discours de ce rapport à l'égard des moyens de réduction du risque s'oriente principalement vers les caractéristiques matérielles du système de commande relatif à la sécurité de la presse. L'étude est réalisée sur deux petites presses en usines, mais surtout sur la presse de l'IRSST (leur tonnage : 38 000 kg (38 t)).

À la lumière de ce qui est dit précédemment, il est proposé d'étudier, dans la suite du présent mémoire, les points suivants non abordés dans la littérature, mais complémentaires à ce qui s'y trouve :

- considérer les risques liés à la maintenance en plus de ceux liés à la production ;
- tenir compte des petites presses autant que des grandes ;
- considérer la presse avec ses périphériques et non pas la presse seule, dans un contexte de maintenance et de production ;
- prendre en compte l'ensemble de la situation de travail, lors des interventions de maintenance et de production ;
- porter un regard sur les pratiques en matière d'intégration de parties de systèmes de commande relatives à la sécurité et à la coordination « presse-périphérique(s) »,

ainsi que les difficultés d'appliquer des prescriptions normatives lors de l'intégration ;

- effectuer une démarche rigoureuse d'estimation *a posteriori* du niveau de performance d'une FS propre à une presse à injection de plastique horizontale, afin d'aider les intégrateurs de systèmes de commande relatifs à la sécurité. Cette démarche est transposable (avec quelques adaptations) à d'autres machines automatisées. Des démarches similaires [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63] appliquées à des machines automatisées existent, mais leur caractère abrégé et souvent erroné justifie la démarche proposée dans ce mémoire.

Différents points balisent l'étude :

- l'identification du risque et la réduction du risque dont il est question dans ce mémoire ne consistent pas en une application intégrale du processus de gestion de risque : aucune estimation du risque, aucune évaluation du risque n'est faite. Ce sera aux acteurs concernés, dans les entreprises, d'appliquer l'exercice complet d'appréciation du risque, afin de choisir les moyens de réduction du risque qui correspondent le mieux à leur cas. Ce choix pourra être éclairé par l'évaluation des principes de sécurité présentée au chapitre 2 de ce mémoire ;
- par « identification du risque » nous entendons identifier des composantes du risque ou des façons de faire menaçant la sécurité des travailleurs lors de la maintenance et de la production ;
- par « réduction du risque » nous entendons, d'une part, répertorier les moyens utilisés en entreprises pour réduire ces risques, d'autre part, évaluer (commenter) les principes de sécurité qui leur sont appliqués ;
- les équipements périphériques considérés lors des visites en usines sont ceux qui menacent la sécurité des travailleurs lors des interventions de changement de moule ou de maintenance dans la zone du moule. Pourquoi la zone du moule ? Déjà sans équipement périphérique, c'est la zone à plus haut risque de la presse : Sonet et al. [64] avancent que « la protection la plus importante est celle de la zone du moule » ;

- la démarche d'estimation *a posteriori* du niveau de performance d'une FS consiste, ici, uniquement en une validation architecturale de la FS. Pour valider complètement la FS, une validation par essais et analyse [65] doit aussi être faite ;
- vu l'ampleur de l'étude, celle-ci ne portera que sur la zone dangereuse délimitée par l'ovale de la figure 1.7, plutôt que d'aborder les risques de toutes les zones dangereuses de la presse. Cette zone ovale comprend la zone du moule, la zone de l'ouverture d'évacuation des pièces produites et un demi-disque de rayon d'un mètre⁶ situé de part et d'autre de la machine. Ce périmètre permet de considérer les risques inhérents aux équipements situés autour de la presse et qui peuvent compromettre la sécurité du travailleur intervenant dans la zone du moule.

⁶ Le choix de ce rayon est inspiré du tableau 3 de la norme ISO 13857:2008 où, pour une limitation du mouvement uniquement au niveau de l'épaule et de l'aisselle, une distance de sécurité minimale de 850 mm est recommandée [66]. Ainsi, le travailleur est à risque s'il se trouve à l'intérieur d'un rayon de 850 mm par rapport au phénomène dangereux. Comme dans notre cas, le bras du travailleur peut être libre de tout mouvement, le rayon de 1 m a été choisi pour tenir compte de la possibilité du travailleur de se pencher, volontairement ou accidentellement, en vue d'atteindre la zone du moule.

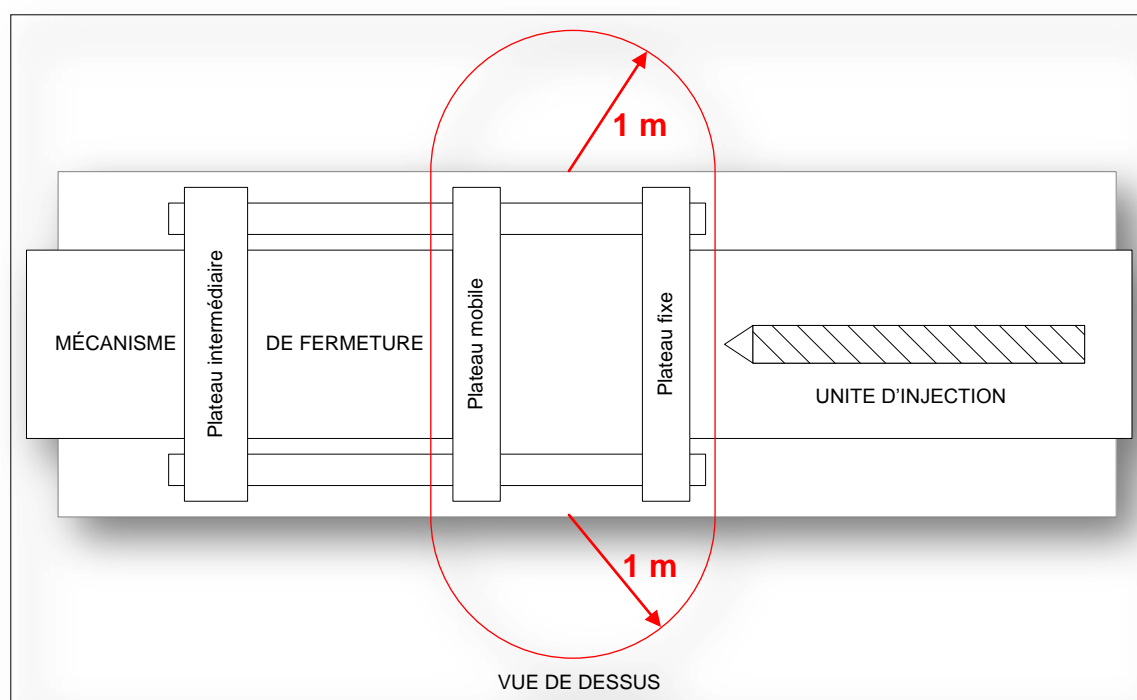


Figure 1.7 : Délimitation (en ovale) de la zone dangereuse concernant l'étude

CHAPITRE 2 DONNÉES RECUEILLIES EN USINES

Des données ont été recueillies lors de quatre visites en usines afin de :

- mieux comprendre les risques auxquels sont exposés les travailleurs lors de la maintenance et de la production dans la zone du moule de presses ayant des équipements périphériques ;
- identifier et évaluer (commenter) les moyens de réduction de ces risques ;
- caractériser les interventions observées (ex. : utilisation du cadenassage ou d'une FS ? Pourquoi ?).

La méthodologie suivante a été utilisée pour la collecte de données:

- élaboration d'un outil de collecte de données, validé après son ajustement à la suite d'une visite préliminaire en usine et par une évaluation par les membres du comité de suivi (cf. comité de suivi mentionné dans l'avant-propos). L'outil est disponible à l'annexe 4 ;
- échanges avec des monteurs-ajusteurs de moule, mécaniciens, électromécaniciens et représentants d'employeurs. L'outil de cueillette de données guidait ces échanges ;
- observations d'interventions de maintenance et de production ;
- photographies et vidéos de l'environnement de la presse lors des interventions, en guise d'aide-mémoire lors de la compilation des données recueillies.

À la visite préliminaire, nous étions trois à recueillir des données. Lors des quatre visites suivantes, nous étions deux. Les visites ont duré entre une demi-journée et 1 journée, sauf la troisième qui s'est étendue sur deux jours vu la complexité et la grandeur de la presse, ainsi que l'ampleur des tâches observées. Après chaque visite, les membres de l'équipe de recherche présents lors de la visite se réunissaient (ou en conférence téléphonique) pour mettre en commun et valider les informations recueillies.

La présentation des résultats relatifs aux visites s'inspire du concept « MÉLITO » (présenté à la section 1.4) normalement utilisé pour les enquêtes et analyses d'accidents. Il est vrai que dans notre cas, nous n'enquêtons, ni analysons d'accident, mais **nous examinons les éléments de la situation de travail qui peuvent altérer** (facteurs de

risque [67, 68] à la source d'accident éventuel dans la zone du moule) **ou préserver** (moyens de réduction du risque) **la santé et la sécurité des travailleurs**. Après tout, les risques propres aux composants de la situation de travail interagissent entre eux. Une analyse ergonomique soutenue permet de comprendre cette interaction et d'y apporter des solutions pour améliorer la qualité de vie au travail. Effectivement, l'ergonomie vise à adapter la situation de travail « aux caractéristiques et aux capacités des travailleurs en général ou de chaque travailleur en particulier » et ce, dans un objectif de prévention [67]. Quoique dans ce mémoire, nous n'entreprenions pas d'analyse ergonomique, différents éléments de la situation de travail seront identifiés afin d'entrevoir les aspects de la situation de travail à améliorer. Pourquoi la situation de travail? L'intervention de maintenance ou de production se réalise dans le cadre d'une situation de travail. La figure 2.1 montre que la situation de travail, c'est un tout.

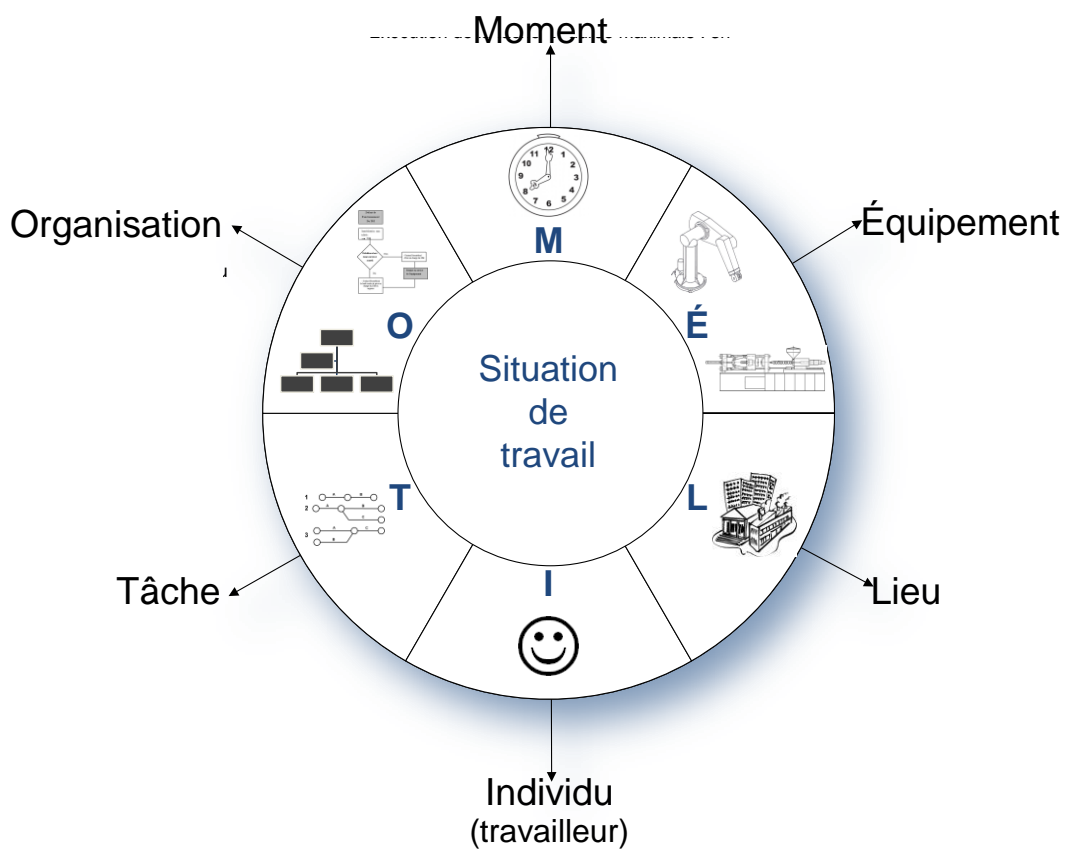


Figure 2.1 : Représentation de la situation de travail

Si nous voulons réduire les risques pour une intervention de travail, s'attaquer seulement aux équipements ne résoudra qu'une partie du problème. Si l'équipement est le plus sécuritaire possible (avec des risques résiduels acceptables) et que le travailleur y applique une méthode de travail lacunaire, un accident peut tout de même survenir.

2.1 Présentation générale des visites effectuées en entreprises

Avant de présenter les risques et moyens de les réduire propres aux six paramètres de la situation de travail, un tableau, une figure et un court texte expliquent le contexte de réalisation de chaque visite. Pour faciliter la compréhension, ces six paramètres sont présentés dans cet ordre logique : **lieu, tâche, individu, organisation, moment, équipement**.

Usine A (≈ 70 employés) : 1^{ère} visite

Tableau 2.1 : Mise en situation de la visite à l'usine A

Participants rencontrés	Petite presse	Périphériques considérés	Opérations observées
<ul style="list-style-type: none"> • Électromécanicien • Monteur-ajusteur de moule • Coordonnatrice de gestion • Directrice en santé et en sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnage : 600 000 kg (600 t) • Produits : raccords de tuyauterie • Année de fabrication : 1996 (selon plaque signalétique) ou 1997 (selon fiche technique de la presse) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pont roulant • Convoyeur d'évacuation de pièces • Convoyeur de transfert • Escabeau 	<ul style="list-style-type: none"> • Démontage de moule ($\Delta t \approx 45$ min) • Montage de moule ($\Delta t \approx 1$ h 45 min)

Selon l'électromécanicien rencontré, la presse visitée est conçue d'origine pour fonctionner sans périphérique. Aucune communication n'existe entre elle et les 2

convoyeurs périphériques (cf. figure 2.2). Ces convoyeurs sont indépendants les uns des autres. Ainsi, la presse fonctionne selon un cycle propre aux presses à injection de plastique horizontales en général (cf. cycle décrit à la figure 1.3). Dans l'espace de travail étudié de l'usine A (tout comme pour les trois autres usines), un pont roulant est placé au-dessus de la presse et permet de manutentionner les moules. Un convoyeur d'évacuation des pièces produites et des carottes est placé à l'horizontal et achemine pièces et carottes à un convoyeur de transfert. Ce dernier achemine les pièces et carottes à un convoyeur central au bout duquel un opérateur entreprend le tri entre les pièces et les carottes. Sur la figure 2.2, des flèches indiquent le sens du transport des pièces et des carottes. L'escabeau, tout comme les escabeaux rencontrés lors des autres visites, permet au travailleur d'atteindre des endroits inaccessibles de la presse depuis le sol.

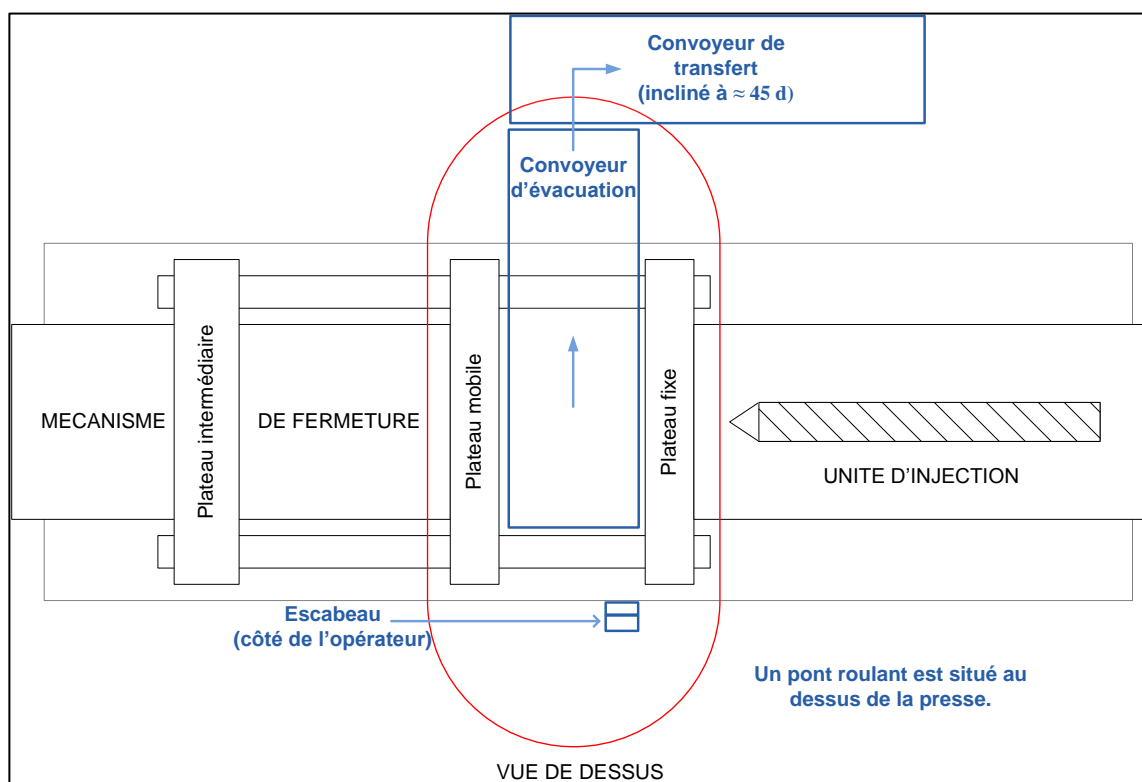


Figure 2.2 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine A

Moyens de protection installés :

- Protecteur de l'opérateur (mobile verrouillé)
- Protecteur opposé à l'opérateur (mobile verrouillé)
- Protecteur d'évacuation
- Système de blocage mécanique (barre mécanique)

Usine B (≈ 200 employés) : 2^{ème} visite

Tableau 2.2 : Mise en situation de la visite à l'usine B

Participants rencontrés	Grande presse	Périphériques considérés	Opération observée
<ul style="list-style-type: none"> • Chef mécanicien • Régleur et monteur-ajusteur de moule • Directeur de production 	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnage : 10^6 kg (1 000 t) • Produits : bacs de capacités ≈ 16 gallons • Année de fabrication : 1996 	<ul style="list-style-type: none"> • Pont roulant • Robot récupérateur de pièce (robot installé après la presse) • 2 escabeaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Montage de moule ($\Delta t \approx 1$ h)

D'après le chef mécanicien rencontré, la presse est conçue d'origine pour fonctionner avec ou sans périphérique(s). Avec ou sans robot, le cycle de la presse est celui de la figure 1.3, avec la différence que l'étape d'extraction des pièces est assurée par le robot. Sur la figure 2.3, des flèches indiquent le sens de déplacement transversal du robot : il extrait la pièce, la dépose sur un convoyeur (hors de la zone d'étude), puis attend l'ouverture du moule pour une prochaine extraction de pièce.

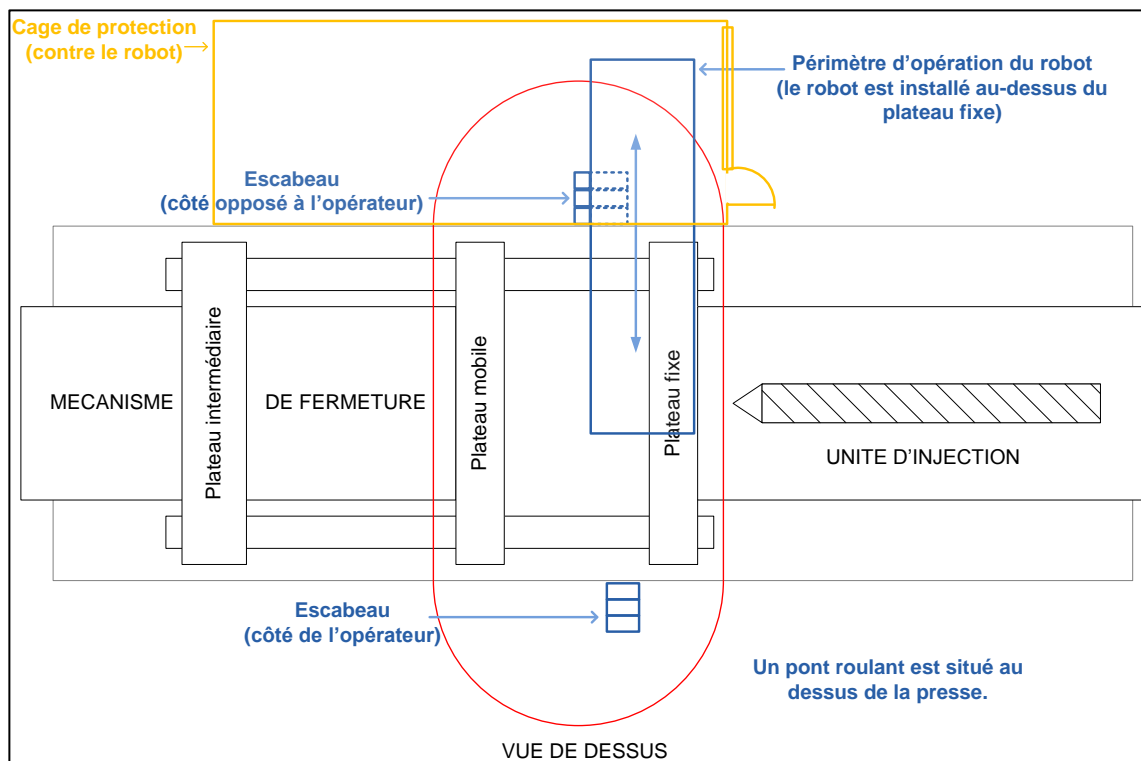


Figure 2.3 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine B

Moyens de protection installés :

- Protecteur de l'opérateur motorisé (mobile verrouillé)
- Protecteur opposé à l'opérateur (mobile verrouillé)
- Cage de protection (avec porte non instrumentée ; l'installation du système de verrouillage est prévue plus tard)
- Système de blocage mécanique (barre mécanique)

Usine C (≈ 200 employés) : 3^{ème} visite

Tableau 2.3 : Mise en situation de la visite à l'usine C

Participants rencontrés	Grande presse	Périphériques considérés	Opération observée
<ul style="list-style-type: none"> • Électromécanicien • Régleurs et monteurs – ajusteurs de moule • Responsable des essais de moule • Directeur du département 	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnage : $2,2 \times 10^6$ kg (2 200 t) • Produits : couvercle de feu arrière d'une voiture • Année de fabrication : 2002 	<ul style="list-style-type: none"> • Pont roulant • Robot récupérateur de pièce (installé en même temps que la presse) • Convoyeur de transfert (installé après la presse et le robot) • 2 escabeaux • Passerelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Montage de moule ($\Delta t \approx 8$ h) • Inspection, nettoyage et polissage des empreintes du moule ($\Delta t \approx 40$ min) • Essais de production ($\Delta t > 4$ h)

Contrairement aux presses visitées qui possèdent un baril d'injection, celle de l'usine C en comprend quatre. La presse comporte également un moule à deux empreintes et un plateau rotatif sur le plateau mobile, afin d'accélérer le rythme de production : au lieu de produire un couvercle par cycle, un couvercle et demi est produit. Au cycle suivant, la demi-pièce est complétée et parallèlement, une autre demi-pièce se crée. Chaque pièce est donc moulée selon un procédé en deux temps. Le cycle de la presse correspond à celui de la figure 1.3 avec une variante : entre les étapes d'extraction de pièce et de fermeture du moule, le plateau rotatif pivote de 180° pour permettre la production du demi-couvercle et entamer la production d'une nouvelle demi-pièce. Selon l'électromécanicien rencontré, la presse est conçue d'origine pour fonctionner avec des périphériques. En mode automatique, le robot récupère la pièce à l'étape « extraction des pièces », la dépose sur le convoyeur, puis attend la prochaine ouverture du moule. En mode semi-automatique, un travailleur récupère la pièce à la place du robot et le

convoyeur est éteint. Évidemment, pour pénétrer dans la zone du moule, le travailleur ouvre le protecteur de l'opérateur, pour empêcher le mouvement d'éléments mobiles.

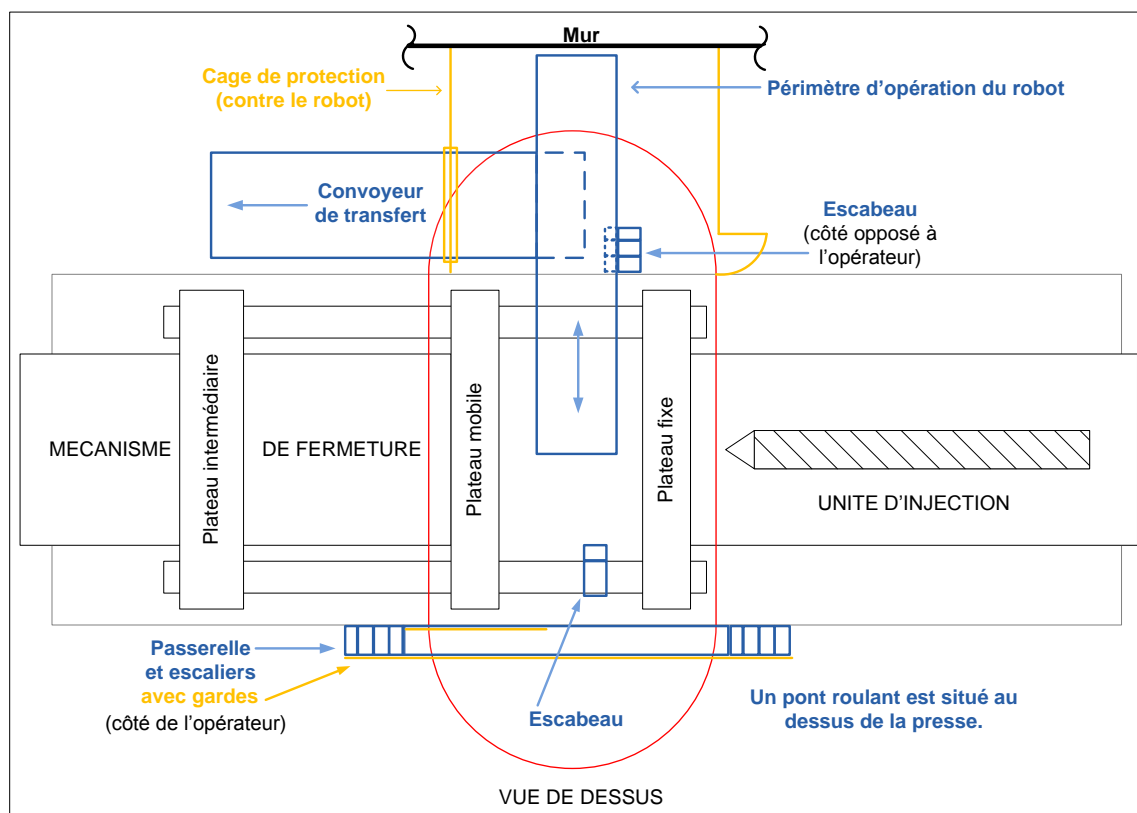


Figure 2.4 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine C

Moyens de protection installés :

- Protecteur de l'opérateur motorisé (mobile verrouillé)
- Protecteur d'évacuation
- Cage de protection avec porte verrouillée
- 4 tapis sensibles au fond de la zone du moule
- 1 tapis sensible sur le cylindre de guidage inférieur situé du côté de l'opérateur

Un protecteur opposé à l'opérateur existe, mais il reste toujours ouvert. Son rôle étant relayé par la cage de protection, nous le considérons absent.

Usine D (≈ 80 employés) : 4^{ème} visite

Tableau 2.4 : Mise en situation de la visite à l'usine D

Participants rencontrés	Petite presse	Périphériques considérés	Opération observée
<ul style="list-style-type: none"> • Technicien en changement de moule, réglage, mise en route • Technicien manufacturier 	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnage : 350 000 kg (350 t) • Produits : dominos (électricité) • Année de fabrication : 2004 	<ul style="list-style-type: none"> • Pont roulant • Robot récupérateur de pièce (installé après la presse) • Convoyeur d'évacuation • Convoyeur de transfert • Granulateur • 1 escabeau 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation d'inserts dans le moule fixé sur la presse ($\Delta t \approx 45$ min)

D'après le technicien manufacturier rencontré, la presse est conçue d'origine pour fonctionner avec ou sans périphérique(s), car l'ajout d'interface robot, par exemple, y est permis. Ici, le robot récupérateur de pièce est intégré à la presse. Les convoyeurs sont indépendants du système « presse-périphériques ». Lorsque la presse fonctionne sans robot, son cycle est celui de la figure 1.3. Lors du fonctionnement avec robot, le système « presse-robot » exerce le cycle automatique suivant :

1. ouverture du moule ;
2. préhension des dix pièces produites et de la carotte par le robot récupérateur ;
3. fermeture du moule, une fois le bras du robot hors de la zone du moule. Entretemps, le bras du robot jette la carotte dans le granulateur ;
4. pose des dix pièces sur la table d'assemblage par le robot récupérateur ;
5. emplacement en position haute du robot afin d'attendre la réouverture du moule (tandis que le robot attend, d'autres pièces sont en train d'être moulées dans la presse).

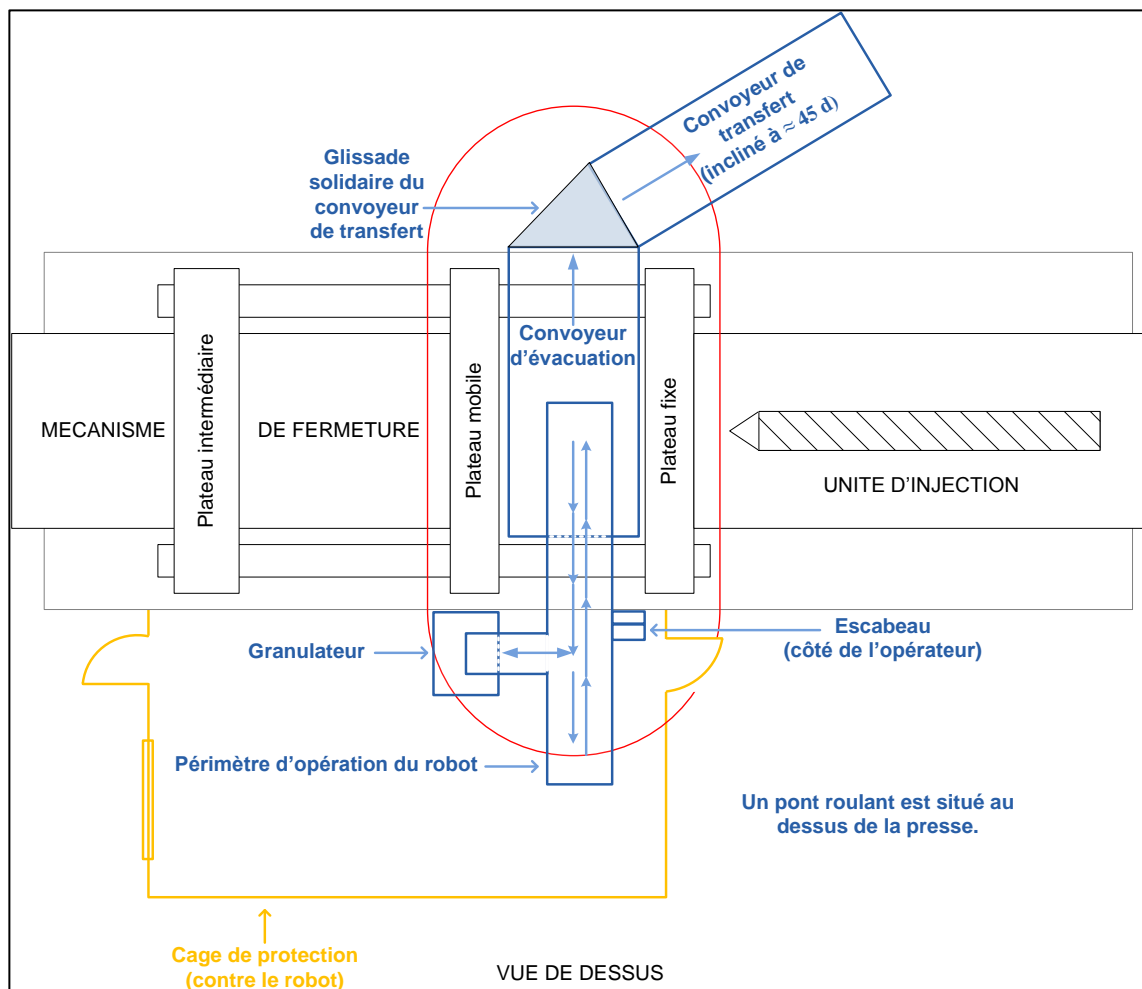


Figure 2.5 : Équipements périphériques considérés pour la visite de l'usine D

Moyens de protection installés :

- Protecteur opposé à l'opérateur (mobile verrouillé)
- Protecteur d'évacuation
- Cage de protection avec deux portes verrouillées

Un protecteur de l'opérateur et un système de blocage mécanique existent, mais le protecteur reste toujours ouvert et le système de blocage mécanique est inactif. Le rôle de ce protecteur étant relayé par la cage de protection, nous le considérons absent, tout comme le système de blocage mécanique.

2.2 Lieu : composantes du risque et moyens de réduction du risque

Les figures 2.2 à 2.5 viennent de nous donner une idée représentative du lieu de travail en termes de disposition des équipements et des protecteurs qui ont été rajoutés au système (ex. : cage, gardes sur la passerelle). Par ailleurs, dans certains lieux de travail visités, nous pouvions percevoir différents facteurs de risque ou phénomènes dangereux menaçant la sécurité des travailleurs. Heureusement, dans d'autres lieux de travail visités, des moyens de réduction de ces risques étaient appliqués.

Le tableau 2.5 présente les différents facteurs de risque et phénomènes dangereux auxquels les travailleurs étaient exposés lors des visites, ainsi que les dommages éventuels qui s'y rattachent.

Tableau 2.5 : Composantes du risque propre au lieu

Facteur de risque	Dommage associé
Bruit	Altération ou perte de l'ouïe Acouphènes
Vapeurs de plastique chaud	Irritation des voies respiratoires
Présence de granules de plastique au sol	Chute de plain-pied due à une glissade
Présence de graisse au sol	Chute de plain-pied due à une glissade
Présence d'huile hydraulique au sol	Chute de plain-pied due à une glissade
Espace de travail (sur le sol, la presse ou la passerelle) encombré par des outils ou des pièces produites	Chute de plain-pied due au trébuchement Chute en hauteur due au trébuchement
Irrégularité du sol (par la présence de tapis) ou de la surface de travail (se déplacer sur le cylindre de guidage de la presse)	Chute de plain-pied due au trébuchement Chute en hauteur depuis l'escabeau branlant (car à cheval sur le sol et le tapis) ou sur le cylindre de guidage
Encombrement de l'espace de travail par les travailleurs	Hausse de stress (besoin de passer pour exécuter sa tâche)
Lieu de travail inhabituel du travailleur	Hausse de stress par son manque de connaissance du lieu

Le tableau 2.6 présente des moyens pour réduire ces risques.

Tableau 2.6 : Moyens de réduction des risques inhérents au lieu

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Bruit	Port de bouchons ou de casque auditifs	2 / 4
Vapeurs de plastique chaud	Ventilation à la source	2 / 4
	Ventilation générale (mécanique ou naturelle)	4 / 4
Présence de granules de plastique, de graisse ou d'huile hydraulique au sol	Garder le sol propre (ex. : en responsabilisant chaque employé ou en embauchant un travailleur à temps plein pour nettoyer le sol)	2 / 4
Espace de travail (sur le sol, la presse ou la passerelle) encombré par des outils ou des pièces produites	Installer une table (rétractable ou non) à proximité de la zone du moule.	1 / 4
	Du côté de l'opérateur et du côté opposé à l'opérateur, installer un plateau aimanté et à rebords pour retenir les outils de travail souvent métalliques. Idéal : ce plateau serait à la portée de l'opérateur et fixé au bâti de la machine, avec un bras télescopique permettant de le déployer au besoin.	0 / 4
Irrégularité du sol (par la présence de tapis)	Placer l'escabeau complètement sur le sol ou complètement sur le tapis	2 / 2
	Prévoir un tapis suffisamment grand pour recevoir l'escabeau	0 / 2
Irrégularité de la surface de travail (se déplacer sur le cylindre de guidage de la presse)	Fixer, si possible, l'escabeau sur le cylindre de guidage pour éviter de le rendre branlant	0 / 1
Encombrement de l'espace de travail par les travailleurs	Dégagement du lieu en assignant une place au travailleur	0 / 1

Tableau 2.6 : Moyens de réduction des risques inhérents au lieu (suite)

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Lieu de travail inhabituel du travailleur	Mise à disposition du travailleur d'un bouton d'arrêt d'urgence portatif et aimanté qu'il peut poser sur le moule. Cela crée un sentiment de sécurité (moins de stress). Il faut brancher ce bouton correctement pour que ce sentiment soit fondé.	1 / 1

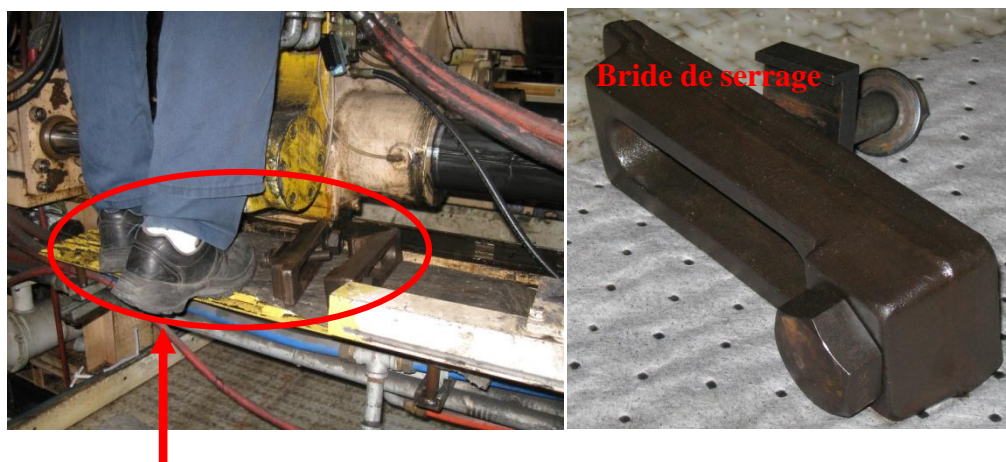


Figure 2.6 : Risque que le monte-ajusteur de moule chancelle à cause des deux brides de serrage qu'il a posées sur le bâti de la presse

- ⚠ Lors des visites, l'éclairage et la température ambiante étaient adéquats (les visites ont été réalisées en automne). Cependant, en été, la température ambiante peut devenir insoutenable et rendre davantage pénible les activités des travailleurs, le procédé d'injection de plastique étant exothermique. Une solution intéressante, observée dans l'une des usines visitée, est de climatiser l'usine en été. Le directeur de cette usine a confirmé que la température ambiante fraîche encourage le personnel à travailler.
- ⚠ Afin de réduire la toxicité de l'air due à l'émanation de vapeurs de plastique, nous proposons : la ventilation à la source et la ventilation générale. D'après Gagnon

[69], la première solution offre de nombreux avantages sur la ventilation générale conventionnelle. Par exemple, la ventilation à la source, en plus d'assurer la sécurité du travailleur en contrôlant les polluants à leur point d'émission, est plus économique en termes énergétiques : « avec la capture à la source, nous aurons besoin de 90 à 95 % de moins que le débit requis qu'avec la ventilation générale conventionnelle, et ce, pour en arriver à une protection similaire » [69]. Malheureusement, les systèmes de ventilation à la source observés sont efficaces lors de la purge au niveau de la buse, mais pas pour la purge ou les tests d'injection de plastique au niveau du moule, lors des essais de production par exemple. Dans ce cas, la ventilation générale mécanique ou naturelle peut aider à assainir l'air ambiant.

2.3 Tâche : composantes du risque et moyens de réduction du risque

Les tâches exécutées et observées sont des interventions de production (1 démontage de moule, 4 montages de moule, 1 essai de production, 1 installation d'inserts) et des interventions de maintenance (inspection, polissage et nettoyage de l'empreinte du moule) dans la zone du moule. Le changement de moule, tout comme l'installation d'inserts sont entrepris pour changer de production (changement de série). L'inspection des empreintes du moule est réalisée pour s'assurer de la qualité de la pièce produite. Comme l'inspection a révélé des défauts (fissures et tâches) dans une empreinte, il a fallu polir et nettoyer le moule. L'annexe 5 présente les étapes observées lors de l'exécution de ces tâches. Contrairement à ce qui est conseillé dans des documents [12, 17, 50] de la revue de littérature, nous avons remarqué qu'après ces tâches, aucun travailleur ne vérifiait le fonctionnement des moyens de protection en place. D'après les échanges avec les participants à l'étude, la forte compétition dans le secteur de la plasturgie n'invite pas les travailleurs à vérifier les moyens de protection avant ou après chaque intervention sur la machine et ce, pour gagner du temps.

Comme pour le lieu, différents éléments liés au paramètre « tâche » peuvent altérer la sécurité du travailleur. Ce paramètre inclut des éléments, tels : les méthodes de travail

utilisées, les gestes ou mouvements mis en œuvre, le respect ou non des procédures de travail. Les moyens de réduction du risque concernant la « Tâche » résident dans les méthodes de travail sécuritaires et les stratégies développées par les travailleurs pour réguler leur activité afin de maintenir un équilibre entre leur santé et la production.

La tâche, c'est la « commande » adressée au travailleur pour exécution. L'activité est l'ensemble des moyens mis en œuvre par le travailleur pour effectuer la tâche [68]. L'activité comprend trois composantes : physique, cognitive et sociale [68].

Composante physique de l'activité

Le tableau 2.7 présente les différents facteurs de risque liés à la composante physique de l'activité auxquels les travailleurs sont exposés lors des visites. Les dommages associés à ces facteurs de risque sont les TMS.



Figure 2.7 : Manutention manuelle du moule suspendu

Tableau 2.7 : Facteurs de risque liés à la composante physique de l'activité et moyens de réduction du risque

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Effort de manutention manuelle du moule suspendu (800 kg à 22 000 kg), des vérins (3,5 à 4,5 kg), des brides de serrage (2 kg) (cf. figure 2.7)	Manutentionner le moule en commandant son déplacement depuis le pendant du pont roulant Limiter la durée du port du vérin ou de la bride de serrage en le rapprochant le plus que possible de la zone de travail	3 / 4
Mouvements répétés de l'ouverture-fermeture du protecteur de l'opérateur (lors des essais de production en mode semi-automatique, lors du démontage et du montage de moule)	Si la configuration ou le poids du protecteur complique son déplacement, le motoriser et y installer une bordure sensible pour éviter sa fermeture sur le travailleur. Comme l'a confirmé un monteur-ajusteur de moule, l'installation d'un robot récupérateur de pièce est une bonne solution pour réduire les risques de TMS : sa présence évite au travailleur d'aller chercher la pièce à maintes reprises et d'ouvrir et de fermer le protecteur de l'opérateur.	2 / 2 2 / 4
Mouvements répétés de l'ouverture-fermeture du protecteur opposé à l'opérateur (lors du changement de moule, ou l'installation d'inserts)	Si la configuration du protecteur le rend difficile à déplacer, le motoriser et y installer une bordure sensible pour éviter sa fermeture sur le travailleur. N.B. Le peu de sollicitation de ce protecteur peut expliquer sa non-motorisation sur le terrain.	0 / 1

Tableau 2.7 : Facteurs de risque liés à la composante physique de l'activité et moyens de réduction du risque(suite)

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Va-et-vient entre le côté de l'opérateur et le côté opposé à l'opérateur (lors de l'installation des brides de serrage ou boulons, surtout lors de l'installation des flexibles d'eau froide et d'eau chaude)	Stratégie : terminer les activités du côté de l'opérateur avant d'entamer celles du côté opposé à l'opérateur (ou inversement).	3 / 4
Montée et descente répétées entre la passerelle et le plancher de la zone du moule situé à un niveau plus bas	Assurer la récupération de la pièce par un robot plutôt qu'un travailleur. Les préhenseurs du robot doivent être appropriés pour éviter d'échapper les pièces dans la zone du moule.	0 / 1 0 / 1
Postures contraignantes répétées : pencher le tronc dans la zone du moule afin de boulonner le moule ou les inserts, brancher les flexibles, installer les vérins hydrauliques pour la rotation des noyaux (voir l'opérateur grimacer à chaque effort déployé pour boulonner montrait combien la tâche était pénible. Un monteur-ajusteur de moule a avoué avoir mal au dos à force de boulonner.)	Revoir la conception des presses : le concepteur devrait penser une presse qui limite les postures contraignantes (ainsi que la durée d'exposition aux risques liés aux mouvements des plateaux fixe et mobile) dans la zone du moule). Pouvoir installer le moule depuis l'extérieur de la presse est souhaitable. Un rail fixé sur chaque plateau (fixe et mobile) de la presse pourrait être déployé hors de la zone du moule pour y installer les parties fixe et mobile du moule. Un seul rail pourrait être déployé à la fois afin d'éliminer des phénomènes dangereux (ex. : fermeture du moule). Une fois la partie du moule installée, la translater sur le plateau correspondant (fixe ou mobile).	0 / 4

Les tâches observées, les plus exigeantes physiquement, sont :

- le démontage de moule (4 ouvertures et 3 fermetures du protecteur de l'opérateur, avec 4 cadenassages et 3 décadénassages de ce protecteur pour éviter un démarrage par un tiers ; 1 va-et-vient pour ouvrir et fermer le protecteur opposé à l'opérateur) ;
- montage de moule (2 à 4 ouvertures et 3 fermetures du protecteur de l'opérateur, 1 va-et-vient pour ouvrir et fermer le protecteur opposé à l'opérateur).

Composante cognitive de l'activité

Le tableau 2.8 présente des éléments de la composante cognitive de l'activité en identifiant par le symbole « ☺ », les méthodes de travail exemplaires et par « ☹ », celles qui ne sont pas recommandées.

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque

Méthode de travail observée		Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
Application de méthodes de travail			
☹	Déplacement du moule à hauteur d'homme	Ceci augmente le risque de heurt par le moule à des zones fragiles du corps humain (ex. : la tête).	1 / 4
☺	Déplacement du moule à hauteur des genoux	Ceci évite le risque de heurt susmentionné.	2 / 3

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
<p>☺ Application d'un cadenassage partiel lors d'une opération de changement de moule (cf. figure 2.8)</p> <p>☹</p> <p>N.B. Le cadenassage complet est appliqué dans les usines seulement lors des réparations de la presse.</p>	<p>Le monteur-ajusteur de moule appose son cadenas sur le protecteur de l'opérateur (mobile verrouillé) et son rail, de manière à empêcher sa fermeture.</p> <p>Ce cadenassage partiel n'élimine pas le risque d'une libération intempestive d'énergie : l'arrêt des éléments mobiles est encore contrôlé par le système de commande de la presse. Cadenasser de la sorte empêche uniquement un démarrage accidentel par un tiers, ce qui est déjà un élément de réduction du risque. Cependant, le succès de ce cadenassage partiel dépend du travailleur : il est arrivé que le cadenas soit mal placé, sa fermeture était donc possible. Grâce à la remarque de l'électromécanicien, le monteur-ajusteur de moule a ensuite apposé son cadenas correctement.</p>	<p>1 / 4</p>

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☺ Utilisation de FS pour sécuriser ☹ l'intervention dans la zone du moule	Si les FS sont conçues et réalisées selon les règles de l'art (ex. : selon les principes de sécurité éprouvés de l'ISO 13849-1), les travailleurs peuvent s'estimer être en sécurité. Sinon, leur sécurité est menacée.	4 / 4
☺ Après avoir appuyé sur l'arrêt d'urgence et ouvert le protecteur de l'opérateur, mettre un panneau de mise en garde sur la console de la presse pour signaler une présence dans la presse	Le travailleur procédait ainsi, car il risquait de ne pas être visible (cf. figure 2.9). Il rentrait dans la presse pour ajuster, à l'arrière du plateau mobile, le mécanisme des éjecteurs.	1 / 2
☹ Aucun cadenassage du robot dont l'espace de fonctionnement appartient à la zone délimitée par l'étude (selon les travailleurs, débrancher le connecteur reliant le robot à la presse suffit pour éviter un démarrage inattendu)	Un cadenassage du robot est souhaitable (au moins, cadenasser un dispositif d'isolation d'énergie apposé sur la fiche de branchement du robot), afin de maîtriser les énergies initiatrices de ses mouvements. Un démarrage inopiné du robot peut occasionner des heurts du travailleur par le bras du robot.	0 / 3

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☹️ Aucun cadenassage des convoyeurs situés dans la zone délimitée par l'étude (certains convoyeurs étaient éteints uniquement, d'autres étaient débranchés)	Cadenasser le convoyeur est souhaitable (au moins, cadenasser un dispositif d'isolation d'énergie apposé sur sa fiche de branchement), à plus forte raison lorsque le travailleur s'en sert comme marchepied pour accéder à la zone du moule.	0 / 3
😊 Enlever momentanément les gardes de la passerelle et ☹️ rétracter le cylindre de guidage supérieur du côté de l'opérateur (lors d'un montage de moule)	Comme le pont roulant ne pouvait surélever le moule plus haut que les gardes et le cylindre de guidage, il a fallu les enlever pour le déplacer vers la zone du moule. Certes, cette stratégie facilite la manutention du moule par les travailleurs, mais un risque de chute en hauteur est présent durant ce laps de temps. La vigilance est donc de rigueur.	1 / 1
😊 Remettre les gardes en place une fois le moule placé dans la zone du moule	C'est une bonne habitude à adopter, une fois terminée l'activité qui requerrait leur retrait.	1 / 1
😊 Remettre le cylindre de guidage en place, après l'installation complète du moule	Grâce à la remise en place du cylindre de guidage, la fermeture du moule pourra être verrouillée. La pression exercée lors du verrouillage évite des bavures et projection de plastique chaud.	1 / 1

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☺ Fermer le protecteur de l'opérateur durant la purge lors de l'essai de production.	Heureusement, car il y a projection de plastique et de vapeur sortant violemment par moment. Nous avons observé du plastique fondu projeté sur le protecteur de l'opérateur.	1 / 1
☹ Monter sur la presse pour dégager les crochets (du pont roulant) des œillets du moule (lors du changement de moule)	Si la configuration de certains moules ou de la presse obligent le travailleur à grimper sur la presse, prévoir un escalier stable, avec gardes, permettant au travailleur de dégager les crochets.	1 / 3
☹ Monter sur le moule pour y brancher les câbles électriques (lors du changement de moule)	Si la configuration de certains moules oblige le travailleur à grimper sur ces moules, prévoir un escalier stable, avec gardes, permettant au travailleur d'effectuer ce branchement.	1 / 3
Vérifications assurant la conformité de la pièce par rapport aux critères de qualité		
☺ Vérification, à l'extérieur de la zone du moule, des pièces produites	Bonne pratique pour réduire la durée d'exposition aux risques de la zone du moule	2 / 2
☺ Après la production de chaque pièce (lors des essais), utiliser une lampe de poche pour vérifier l'intégrité de l'empreinte du moule	Cette vérification répétée exige de la minutie et de la concentration. La lampe de poche réduit la pénibilité de l'inspection visuelle de l'empreinte.	1 / 1

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☺ Utiliser une lampe de poche pour vérifier que les orifices du moule soient libres de plastique (après une purge ou une production de pièce lors des essais) et de copeaux de métal (après un fraisage de l'empreinte)	Cette vérification répétée exige de la minutie et de concentration. La lampe de poche réduit la pénibilité de l'inspection visuelle de l'empreinte en éclairant ses orifices obscurs.	1 / 1
Traitement de l'information sensorielle		
☺ Repères visuels : regarder à travers l'orifice d'injection du plateau fixe pour s'assurer que le moule est placé au bon endroit dans la zone du moule	Cela évite d'insérer la tête dans la zone du moule pour vérifier le positionnement du moule.	1 / 2
☺ À la couleur du flexible ou à la lecture des inscriptions gravées sur le moule, savoir dans quel circuit l'installer : circuit d'eau froide ou d'eau chaude.	Réduit l'effort de réflexion pour savoir où va chaque flexible	3 / 4
Stratégies d'adaptation à la situation de travail		
☺ Terminer la plupart des activités du côté de l'opérateur avant d'entamer celles du côté opposé à l'opérateur (lors du changement de moule, ou de l'installation d'inserts)	Cette stratégie permet de minimiser les déplacements du travailleur sur les grandes presses.	3 / 4
☺ Noter, dans un feuillet ou cahier, le lieu de branchement des câbles électriques du moule	Cela permet aux travailleurs de se retrouver rapidement dans le circuit électrique du moule lorsqu'un problème doit être résolu.	1 / 3

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☺ Une fois tous les flexibles hydrauliques branchés d'un côté du moule, lancer leur autre extrémité à brancher par-dessus le moule de manière à ce qu'elle pende de l'autre côté.	Cela minimise les allers retours entre le côté de l'opérateur et le côté opposé à l'opérateur. Cela évite à l'opérateur de se pencher dans la zone du moule pour récupérer les autres extrémités à brancher.	1 / 4
☹ Traverser la zone du moule pour passer du côté de l'opérateur au côté opposé à l'opérateur et vice-versa.	Sur les grandes presses visitées (mesurant plus de 2 m × 7 m), quoiqu'il s'agisse d'un moyen minimisant les déplacements, faire le tour de la presse serait préférable pour réduire la durée d'exposition aux risques de la zone du moule. Sinon, pourvoir la presse d'un système de commande fiable relatif à la sécurité.	1 / 4
☺ Installer une table sur le garde de la passerelle pour poser les pièces produites.	La proximité de la table par rapport à la zone du moule minimise le nombre de déplacement des régleurs et leur permet de poser leurs outils de travail afin d'éviter d'encombrer la passerelle (réduction du risque de chute).	1 / 4

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
☹ Le travailleur (≥ 90 kg) se jette sur les tapis sensibles de la zone du moule à chaque fois qu'il doit aller chercher la pièce.	<p>Le poids du travailleur qui se jette brutalement sur les tapis sensibles risquent d'abimer le circuit de sécurité. Les câbles et interrupteur de position placés sous les tapis ont intérêt à endurer le choc.</p> <p>Le travailleur se pose brutalement sur les tapis sensibles à cause de la pression temporelle et de l'espace considérable entre le tapis sensible et la marche de l'escabeau (situé sur un des cylindres de guidage de la presse, cf. figure 2.4). La pression temporelle n'étant pas réaliste à éliminer, il serait préférable de compléter cet espace par une marche supplémentaire, tout en n'entravant pas la fermeture du moule.</p>	1 / 1

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
⊗ Monter sur la partie inférieure du protecteur de l'opérateur comme marchepied pour accéder à la zone du moule (pour faciliter le montage de moule)	Procéder ainsi expose le travailleur à un risque de chute en hauteur et finira par fragiliser le système de protection de la presse, voire l'endommager. Par exemple, lors de la visite, le monteur de moule a désengagé involontairement la partie inférieure de la bordure sensible du protecteur de l'opérateur en montant dessus (cf. figure 2.10). Il était donc moins protégé contre les risques de coincement par le protecteur de l'opérateur motorisé. Ce n'est qu'un peu plus tard durant l'opération, qu'il a réalisé qu'une partie de la bordure avait été désengagée à cause du fait qu'il soit monté sur le protecteur (le mouvement de ses pas en montant sur la base du protecteur a déplacé la bordure sensible de sorte qu'elle pende). Une fois qu'il l'a remarqué, il l'a remplacée.	1 / 2
⊗ Contrairement à la procédure, le monteur-ajusteur de moule n'ouvre qu'à moitié le protecteur de l'opérateur afin de monter dessus pour accéder à l'arrière du plateau mobile	Ce non-respect de procédure indique sûrement qu'il faudrait que l'escabeau placé du côté de l'opérateur soit plus large pour faciliter l'accès à l'arrière du plateau mobile.	1 / 2
Gestion du temps		

Tableau 2.8 : Facteurs de risque liés à la composante cognitive de l'activité et moyens de réduction du risque (suite)

Méthode de travail observée	Commentaires	Méthode de travail dans x usines / y usines concernées
⊗ À l'usine où le client était présent, les travailleurs se dépêchaient bien plus que dans les autres usines	Le client payait 450 \$/h pour installer le moule et produire les pièces. Alors, les travailleurs se dépêchaient pour le satisfaire. Quoique ce soit une réalité du terrain, il est possible de se hâter lentement afin d'éviter des erreurs de manœuvre pouvant être à l'origine d'accidents.	1 / 4

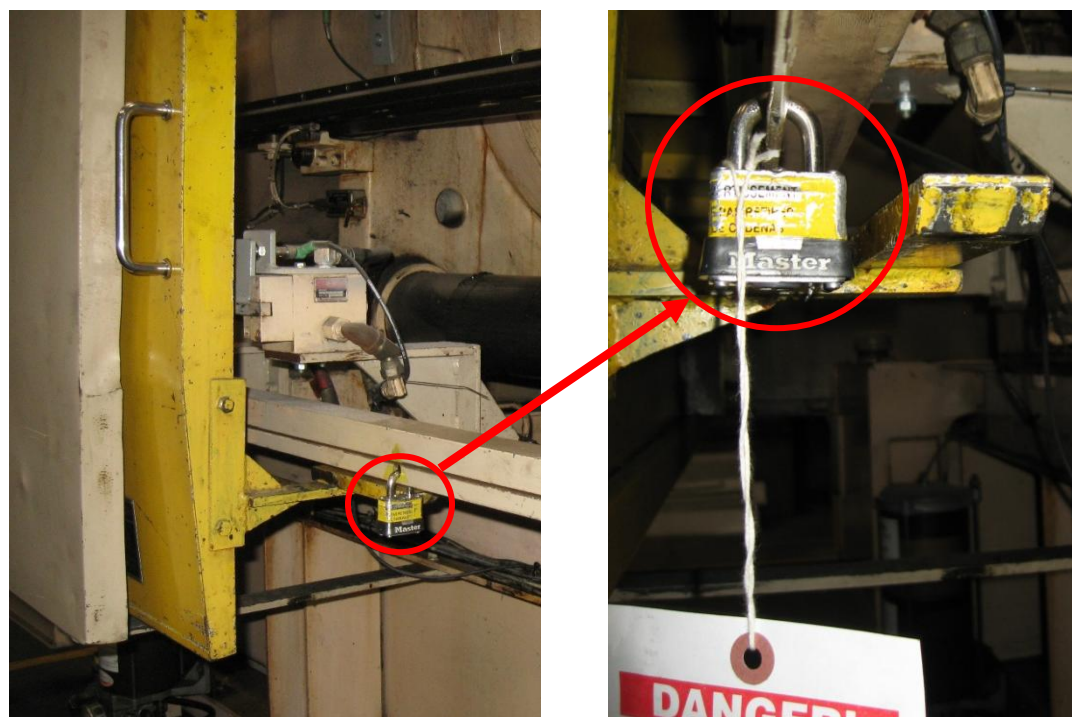


Figure 2.8 : Cadenassage partiel observé : le cadenas bloque le protecteur de l'opérateur sur son rail

⚠ Contrairement à la figure 2.8, il faudrait relier le protecteur de l'opérateur et le rail par un morillon d'abord. Ensuite, apposer le cadenas sur ce morillon. Cela permet à un autre intervenant sur la machine, d'apposer son cadenas au besoin. Remarquez l'étiquette suspendue au cadenas pour informer l'entourage de la raison du cadenassage.



Figure 2.9 : Travailleur partiellement caché à l'arrière du plateau mobile



Figure 2.10 : Partie désengagée de la bordure sensible du protecteur de l'opérateur motorisé

Au cours des visites, les moyens de protection observés n'étaient pas contournés par les travailleurs, ce qui est bien.

Composante sociale de l'activité

Le tableau 2.9 présente le facteur de risque inhérent à la composante sociale de l'activité.

Tableau 2.9 : Facteurs de risque liés à la composante sociale de l'activité et moyens de réduction du risque

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Travail à plusieurs (cf. figure 2.11) → altération possible de la communication → démarrage non désiré d'un élément mobile par un tiers	Si possible, réaliser le travail seul. Cependant, comme l'entraide réduit la charge de travail de chacun, limiter au strict nécessaire le nombre de travailleurs pour une intervention.	0 / 1
	Parler de manière audible, répéter l'information au besoin.	1 / 1
	Réduire le bruit ambiant.	0 / 1
	Porter des protecteurs auditifs qui laissent passer les fréquences de la voix tout en filtrant le bruit ambiant.	0 / 1

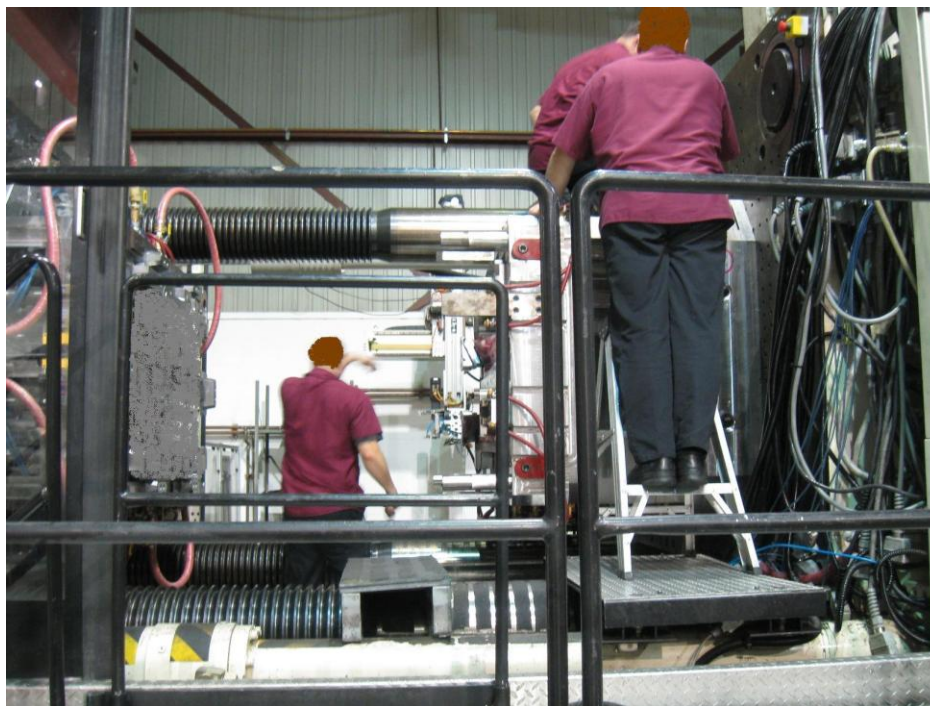


Figure 2.11 : Trois travailleurs dans la zone du moule lors de son montage

2.4 Individu : composantes du risque et moyens de réduction du risque

Tableau 2.10 : Facteurs de risque liés à l'individu et moyens de réduction du risque

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans <i>x</i> usines / <i>y</i> usines concernées par le facteur de risque
Affichage en anglais sur les machines, incompréhensible par les travailleurs qui s'expriment en français uniquement	Mettre un affichage correspondant à la langue parlée par les travailleurs.	0 / 1
	Embaucher des gens qui s'expriment dans la langue d'affichage sur les machines.	0 / 1

Tableau 2.10 : Facteurs de risque liés à l'individu et moyens de réduction du risque (suite)

Facteur de risque	Moyen de réduction du risque	Appliqué dans x usines / y usines concernées par le facteur de risque
Manque d'expérience du travailleur	Formation théorique du travailleur → travailleur averti, conscientisé face aux risques.	3 / 4
	Formation pratique du travailleur → acquisition d'expérience.	1 / 4
	Communiquer aux novices le savoir-faire des travailleurs expérimentés.	1 / 1
Conditions physiques non appropriées pour la tâche.	Embauche de travailleurs qualifiés (en termes de connaissances, de capacités physique et mentale).	4 / 4
Fonction non habituelle de l'individu (ex.: polisseur, client non habitués à être dans la zone du moule).	Créer un sentiment de confiance bien fondé chez l'individu : avoir une presse sécurisée adéquatement selon le niveau de risque + fournir à l'individu un bouton d'arrêt d'urgence mobile.	1 / 4

2.5 Organisation : composantes du risque et moyens de réduction du risque

L'« Organisation » regroupe : les instructions, les règles et procédures de sécurité prescrites par la direction.

Règles générales de sécurité

À l'usine B, il est interdit d'ouvrir à moitié le protecteur de l'opérateur pour que sa partie inférieure serve de marchepied pour accéder à l'arrière du plateau mobile. Nous avons constaté au tableau 2.8 que cette règle n'est pas respectée. Dans pareil cas, l'organisation doit chercher à comprendre le pourquoi du non-respect de procédures et y remédier le plus rapidement possible.

Concernant le polissage ou le nettoyage d'un moule, à l'usine B, l'ampleur de la tâche est évaluée avant son début, afin d'en prévoir la durée approximative. Si la durée prévue avoisine six heures, le travailleur devra polir ou nettoyer le moule à l'atelier plutôt que dans la zone du moule. Cela réduit la durée d'exposition aux phénomènes dangereux de la zone du moule et ainsi, réduit le risque d'accident.


À l'usine D, il est interdit en tout temps de monter sur la presse pour éviter une chute du travailleur. Cependant, dans les cas de blocage dans la zone du moule où de chute d'objet dans cette zone, le travailleur a informé que, lorsqu'il est impossible de faire autrement, il monte sur la presse pour trouver ce qui bloque ou voir où se cache l'objet échappé. À cette usine, le travailleur a avancé qu'il est facile de respecter la plupart des moyens de réduction du risque mis en place dans l'usine, car ces moyens ont été déterminés par consensus entre les représentants de l'employeur et les travailleurs. Il dit que la plupart de ces moyens de réduction du risque tient compte de la réalité du travail.

Dans certaines des usines visitées, les règles de sécurité pour les équipements suivants sont prescrites, mais pas toujours appliquées :

Œillet, brides de serrage, boulons :

- les inspecter visuellement avant usage ;
- éviter de les utiliser s'ils sont usés, endommagés ou modifiés ;


Pont roulant : avant ou lors de son utilisation :

- éviter d'utiliser le pont roulant s'il semble défaillant ou usé ;
 -  normalement un pont roulant (incluant élingues et crochets) doit être inspecté au début du quart de travail [5] ;
- ne jamais dépasser la capacité maximale du pont roulant ;
- établir un périmètre de sécurité ;
- avertir les gens autour ;
- éviter de rester sous la charge ;
- stabiliser la charge (éviter le balan) ;

- la charge doit être portée au plus, à la hauteur des genoux, dès que possible ;

Moule : manutention :

- ne jamais tenter de lever un moule avec des équipements non prescrits pour cette tâche ;
- ne jamais tenter de démonter un moule de la presse sans avoir préalablement fixé celui-ci au crochet du palan et avoir tendu les élingues ;
- ne jamais actionner l'ouverture du plateau de la presse sans avoir préalablement vérifié que le moule est solidement arrimé aux plateaux fixe et mobile.

 Conseil : utiliser un crochet avec linguet de sécurité pour porter le moule, afin d'éviter que le crochet ne se désengage de l'œillet du moule.

Procédures de sécurité

Concernant les étapes à suivre pour réparer la presse, changer un moule, le nettoyer, entreprendre des essais de production, installer des inserts, bref, toute opération relevant de la compétence et formation du travailleur, les usines visitées n'ont pas de procédures à suivre. Les représentants d'employeurs rencontrés affirment qu'ils embauchent des gens qui ont la formation et les compétences pour exécuter ces tâches, alors les travailleurs savent très bien comment procéder. Par ailleurs, ces représentants d'employeurs ont informé qu'il existe des procédures écrites que doit appliquer le travailleur pour intervenir de manière sécuritaire dans la zone du moule. À la lecture des procédures, nous remarquons que nous pouvons les catégoriser en trois types : 1) utilisation du cadenassage, 2) utilisation d'une FS, 3) inspection.

Utilisation du cadenassage :

À l'usine A, une procédure de cadenassage partiel (mentionné au tableau 2.8), est proposée pour les changements de moule. Cette procédure permet d'éviter la fermeture accidentelle du protecteur de l'opérateur qui, fermé, autorise le mouvement des éléments mobiles de la zone du moule. Comparé à un cadenassage complet, ce type de cadenassage permet de rendre disponible l'énergie requise pour faire bouger le plateau mobile lors du changement de moule, une fois le protecteur de l'opérateur fermé. À cette

procédure de cadenassage partiel devrait être rajouté le cadenassage des convoyeurs périphériques à la zone du moule (cf. figure 2.12), pour éviter leur démarrage inattendu alors que l'opérateur se trouve sur un des convoyeurs pour accéder à la zone du moule.



Figure 2.12 : Travailleur installant un moule en s'agenouillant sur un convoyeur

Un démarrage intempestif du convoyeur créera un dérapage du travailleur qui de ce fait, se heurtera contre le cylindre de guidage de la zone du moule.

Dans toutes les usines visitées, il existe des procédures de cadenassage complet pour la presse et chaque équipement périphérique. Ces procédures ne sont utilisées que pour des réparations de la presse ou de l'équipement périphérique. Une des procédures a retenu l'attention, car elle limite le cadenassage seulement à l'énergie électrique de la presse (cadenassage de disjoncteurs). Il ne faut pas oublier les énergies hydraulique, pneumatique et autres pouvant être libérées intempestivement durant l'exécution de la

tâche. Une analyse du risque de la machine doit être faite pour savoir quelles énergies menacent la sécurité des travailleurs lors d'une tâche précise et comment s'y prendre pour isoler et condamner cette énergie. Il ne faut pas oublier les énergies sources de danger provenant des équipements périphériques (ex. : robot, convoyeur, granulateur). Les travailleurs rencontrés nous ont dit qu'ils ne cadenassent jamais les robots et convoyeurs avoisinant la zone du moule lorsqu'ils y travaillent. Ils se contentent de mettre l'équipement périphérique à sa position initiale de démarrage (cas des robots), puis de l'éteindre ou le débrancher.

Utilisation d'une FS :

Tel qu'expliqué au tableau 2.8, le cadenassage partiel susmentionné implique l'utilisation de différentes FS : celles liées au protecteur de l'opérateur, celles liées au protecteur opposé à l'opérateur et celles liées à la barre mécanique de blocage. Ces FS empêchent chacune un mouvement d'un élément mobile dans la zone du moule : plateau mobile, noyaux, éjecteurs. Ces mêmes types de FS, notamment celles liées au protecteur de l'opérateur furent très sollicitées lors de l'exécution des tâches observées au cours des visites.

Une autre FS sollicitée est la fonction « arrêt d'urgence ». Aux usines B et D, la procédure d'intervention dans la presse ou dans l'enceinte du robot exige l'actionnement de l'arrêt d'urgence après avoir effectué un arrêt simple de tous les moteurs et pompes de la presse et son robot. De plus, à l'usine B, la procédure veut que l'affiche témoignant d'une présence humaine dans la presse soit apposée (avec du velcro déjà prévu à cet effet) sur la console de la presse. Les observations ont montré que cette façon de faire était respectée à ces deux usines.

Inspection :

L'usine D fait une inspection journalière sommaire de son pont roulant. À deux des quatre usines, une inspection annuelle des ponts roulants se fait à l'interne. Une autre fait faire une inspection de son pont roulant par l'externe (le fabricant) et l'autre n'a pas fait inspecter son pont roulant, mais a reconnu que cela devrait être fait. Trois des usines

visitées ont une fiche d'inspection de leur pont roulant. Trois des usines font l'entretien annuel de leur pont roulant.

Une inspection des moyens de protection se réalise dans trois des usines. Dans au moins deux d'entre elles cette inspection est exigée. Selon les usines, cette inspection se fait chaque trimestre, chaque jour ou après un changement de moule ou une opération de maintenance importante sur la presse. Idéalement, il faudrait réaliser une telle vérification quotidiennement et après toute intervention dans la zone du moule [12, 17].

Exigence du port d'EPI

Dans deux des quatre usines visitées, le port des lunettes de sécurité, des protecteurs auditifs et des gants était exigé et respecté. Par ailleurs, l'absence du port de lunettes de sécurité, de protecteurs auditifs et de gants lors des manipulations du moule à chaud (ex. : température de 71 C lors de l'essai de production) fut une constatation étonnante dans deux usines visitées. De même, l'absence du port de cagoule lors d'interventions dans la zone du moule, dans les quatre usines. Une analyse du risque devrait être réalisée afin que les gestionnaires se rendent compte de la nécessité du port de ces EPI pour protéger les travailleurs et eux-mêmes contre les risques de :

- projection de matière plastique chaude ou de copeaux métalliques ;
- troubles auditifs ;
- brûlures cutanées au contact du moule ou de la matière plastique chaude.

Heureusement, dans toutes les usines, le port des souliers de sécurité était obligatoire et respecté. Toutefois, la conformité du choix des souliers de sécurité face aux risques (choc, électrisation, électrocution, perforation, chute) auxquels sont exposés les travailleurs n'a pas été vérifiée. Il en est de même pour la conformité des autres EPI.

Afin d'obliger les travailleurs à porter des EPI ou à respecter les règles de sécurité et procédures, certains imposent des mesures disciplinaires. D'autres encouragent les échanges entre employeurs et travailleurs afin de favoriser la communication des risques et les raisons pour lesquelles certains refusent de les porter. D'après Fortin [70], ce dernier moyen de procéder est plus fructueux : il crée l'épanouissement plutôt que la

peur chez les travailleurs (c.-à-d., la peur de dévoiler des incidents, des accidents liés au manque d'application des mesures de réduction du risque par crainte d'être puni). Ainsi, en communiquant le risque, l'organisation arrivera à mieux comprendre les raisons de ce manque d'application et ensemble, travailleurs et employeurs trouveront une solution pour remédier à ce problème. Un moyen pour faciliter les échanges entre travailleurs et employeurs est de cultiver la relation entre ces deux groupes par des initiatives pour promouvoir la qualité de vie au travail. À l'usine C, le directeur rencontré a expliqué que plusieurs activités de détente sont réalisées pour le personnel afin qu'ils tissent des liens entre eux. De plus, toutes les initiatives d'amélioration de l'environnement travail (ex. : climatisation de l'usine en été) contribuent à rendre les travailleurs heureux, comme il a été observé à l'usine C. Effectivement, la bonne humeur des travailleurs, l'entente visible entre ces derniers et leur directeur témoignaient de leur bien-être au travail.

Formation

Aux usines A et D, il a été remarqué, au cours d'échanges avec un directeur et des travailleurs, que ceux-ci étaient conscients des risques auxquels ils s'exposaient durant l'exécution de leurs tâches et dans l'usine en général. Cette sensibilisation aux risques, visible de par les échanges verbaux et leur comportement en activité, s'est ancrée en eux grâce à leur implication dans le processus de gestion des risques dans l'usine.

Durant notre visite à l'usine C, au cours d'un entretien avec le directeur de l'usine, nous avons noté qu'il insiste beaucoup sur la formation (ex. : formation en SST, sur les ponts roulants, chariots élévateurs, secourisme, électromécanique). Le directeur profite des périodes creuses en production pour envoyer des employés en formation théorique et pratique, d'où une bonne gestion du temps et des ressources. Il croit fermement en la formation continue de ses employés, car il affirme que plus on est formé, moins on est vulnérable. Ce qui est tout à fait juste ! Selon Beauchamp [7], « vu les nombreux risques qui subsistent sur les presses à injecter, on ne saurait trop insister sur l'importance de la formation des opérateurs et des travailleurs œuvrant dans le voisinage de ces équipements. »

Information

L'information contenue dans ces notes de formation est riche. Par ailleurs, il faut s'assurer que le formateur transmette adéquatement l'information. Par exemple, il est arrivé malheureusement qu'un formateur ait dit à un électromécanicien rencontré lors d'une visite : « La presse est 4 ». En discutant avec lui, il a été compris qu'il voulait dire : « Cette presse est de catégorie 4 ». La notion de catégorie⁷, expliquée dans l'ISO 13849-1, est une caractéristique réservée à des composants de sécurité et des FS, mais pas à une machine dans son ensemble. Cet électromécanicien, très compétent dans la conception de systèmes de commande standard n'avait donc pas su employer le terme exact concernant une notion propre aux systèmes de commande relatifs à la sécurité.

Ce qui fut dommage de constater dans une des usines, était l'absence de plans d'intégration d'équipement. Heureusement, la plupart des usines possédait les plans initiaux de leurs machines et ceux après intégration de périphériques. Il est bon de documenter, par des plans et par écrit, toute modification faite au circuit de commande des machines. Cela permet de laisser des traces lorsqu'un nouveau travailleur désire comprendre comment les installations ont été pensées et réalisées, soit pour sa connaissance personnelle, soit pour faciliter les réparations ou modifications de la machine. Avoir de l'information sur le circuit sur lequel il faut intervenir est un moyen de réduction du risque d'accident. Disposer des plans de la machine pour y intervenir augmente les chances de succès de la réparation ou de la modification. Aussi, à long terme, si le personnel change, le successeur pourra se retrouver plus facilement dans le circuit de la machine.

⁷ On entend par « catégorie » la classification des parties des systèmes de commande relatives à la sécurité (SRP/CS) selon leur architecture, leur résistance aux défauts et leur manière de réagir après un ou plusieurs défauts [2].

2.6 Moment : composantes du risque et moyens de réduction du risque

Travail de nuit

Dans certaines des usines visitées, des travailleurs œuvrent le jour, d'autres la nuit. Le travail de nuit est un facteur qui augmente le risque d'accident : « Les horaires atypiques, et tout particulièrement le travail de nuit, peuvent constituer un facteur de risque pour les travailleurs » [71] et cela, en raison de la baisse de vigilance occasionnée par un manque de sommeil découlant d'une perturbation de l'horloge biologique. « Les statistiques montrent par ailleurs que les accidents de travail, s'ils ne sont pas plus fréquents, sont généralement plus graves lorsqu'ils surviennent la nuit » [71].

Dormir suffisamment est le meilleur moyen pouvant convenir à notre santé pour rester vigilant.

Interruption de l'activité à cause d'une sollicitation par un autre collègue

Il arrive qu'un travailleur, dans l'empressement, laisse son poste de travail dans un état non sécuritaire pour ses collègues. Heureusement, lors d'une des visites où le travailleur fut interrompu au cours de son changement de moule, il prit le temps de ranger ses outils et équipements de manière à ne pas compromettre la sécurité des gens autour : il posa le moule sur le sol plutôt que de le laisser suspendu, il apposa une étiquette sur le protecteur de l'opérateur pour indiquer à ses collègues qu'un travail est en cours sur la presse et qu'il ne faut pas y toucher.

Avant d'interrompre son activité, il est important de s'assurer de l'état sécuritaire de son poste de travail.

Durée d'exposition au phénomène dangereux

Comme mentionné à la section 1.3, la fréquence ou la durée d'exposition au phénomène dangereux est une composante du risque en sécurité des machines. Alors, plus on passe du temps à travailler dans la zone du moule d'une presse à injection de plastique horizontale, plus le risque d'accident dans cette zone croît. Par exemple : lors des visites,

nous avons pu observer des interventions dans la zone du moule pouvant durer de 40 min à 8 h ! Pour ces interventions (sauf les essais de production), la plupart du temps, le travailleur est complètement (cas de l'usine C) ou partiellement (cas des autres usines) dans la zone du moule.

Adopter des stratégies (par exemple, celles étiquetées : « ☺ » au tableau 2.8) qui minimisent cette durée ou impliquent moins de parties corporelles dans la zone dangereuse est à envisager. Par exemple : positionner le moule à l'aide du pendant du pont roulant, plutôt qu'avec les mains pour placer son œillet vis-à-vis du crochet du pont roulant ; pour s'assurer que le moule est situé au bon endroit par rapport à l'orifice d'entrée de la buse, regarder depuis l'unité d'injection, à travers cet orifice, sans pour autant être dans la trajectoire du baril d'injection, si le moule est bien positionné par rapport au plateau fixe ; boulonner ou brider le moule depuis l'extérieur de la presse plutôt que de l'intérieur).

2.7 Équipement : composantes du risque et moyens de réduction du risque

Les tableaux 2.11 à 2.13 présentent les risques liés aux équipements auxquels s'exposent les travailleurs lors des tâches observées (cf. légende ci-dessous). Ces tableaux sont suivis de commentaires concernant les moyens de réduire ces risques.

Légende :

N : maintenance (inspection, polissage et nettoyage)

M : montage de moule

D : démontage de moule

E : essais de production

I : installation d'inserts

Tableau 2.11 : Risques liés aux outils utilisés par les travailleurs

Outil dans <i>x usines</i> <i>4 usines</i>	Risque de ...	Contexte				
		N	M	D	E	I
Moule (4 / 4)	• TMS dus à la manutention manuelle de chaque moule		×	×		
Œillet (4 / 4)	• Écrasement par le moule qui chute en raison de l'œillet qui cède		×	×		
Brides de serrage (3 / 4)	• Écrasement par le moule qui chute en raison des brides de serrage qui cèdent	×	×	×	×	×
Boulons (1 / 4)	• Écrasement par le moule qui chute en raison des boulons qui cèdent	×	×	×	×	×
Clés (pour boulonner, visser) (4 / 4)	• TMS dus aux mouvements répétitifs lors du serrage des brides ou des boulons (mouvements réalisés avec les bras en abduction et le buste penché dans la zone du moule)		×	×		×
Vérins (1 / 4)	• TMS dus à la manutention manuelle de chaque vérin responsable de la rotation des noyaux		×	×		
Fraiseuse (1 / 4)	• Blessure cutanée ou perforation, due au mouvement de rotation de la fraiseuse	×				

⚠ Les sections portant sur les composantes « Tâche » et « Organisation » de la situation de travail proposent des façons de faire et des règles de sécurité exemplaires permettant de réduire les risques mentionnés au tableau 2.11.

Tableau 2.12 : Risques liés aux escabeaux et à la passerelle utilisés par les travailleurs


Autre équipement dans $\frac{x \text{ usines}}{4 \text{ usines}}$	Risque de ...	Contexte				
		N	M	D	E	I
Escabeau (4 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Chute en hauteur en raison de : <ul style="list-style-type: none"> - l'escabeau qui n'est pas à niveau - l'étroitesse des marches en largeur ou en longueur 	×	×	×	×	×
Passerelle (1 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Chute en hauteur 		×	×	×	

- ⚠ Une conception adéquate de l'escabeau (ex. : escabeau à niveau, dimensions suffisantes des marches) permet de contrôler le risque de chute en hauteur. De même, placer des gardes autour de la passerelle minimise ce risque.
- ⚠ Quoiqu'un escabeau et une passerelle génèrent des risques, ils facilitent l'accès du travailleur à la zone du moule (ex. : ils réduisent les risques de TMS en lui évitant de hausser ou en réduisant l'angle d'inclinaison de son buste vers la zone du moule).

Tableau 2.13 : Risques liés aux machines utilisées par les travailleurs

Machine dans <i>x usines</i> <i>4 usines</i>	Risque de ...	Contexte				
		N	M	D	E	I
Presse (4 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Électrisation ou électrocution (surface sous tension) • Brûlure (moule chaud, vapeur ou plastique chaud éjecté du moule, eau ou huile chaude) • Contusion, perforation cutanée, fracture (fouettement d'un flexible) • Écrasement, décès (dans le moule ou le plateau mobile qui se referme intempestivement) • Cisaillement, écrasement, sectionnement, décès (à l'arrière du plateau mobile qui s'ouvre intempestivement) • Heurt par le moule qui pivote à cause du plateau rotatif (installé sur le plateau mobile) qui démarre intempestivement • TMS dus à l'espace restreint de la zone du moule qui impose des postures contraignantes 	x	x	x	x	x
Robot (3 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Choc (mouvement intempestif du bras de robot) • Pincement (mouvement intempestif des préhenseurs du robot) • Électrisation/électrocution (surface sous tension) 	x	x	x	x	x
Convoyeur (3 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Entraînement (courroie en mouvement) • Coincement /écrasement (dans un angle rentrant) • Électrisation/électrocution (surface sous tension) 		x	x		x
Pont roulant (4 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Écrasement (chute du moule ou d'une partie du pont roulant) • Choc (moule se balançant) • Décès découlant de l'écrasement ou du choc 		x	x		

Le granulateur de l'usine D ne figure pas au tableau 2.13, car il ne génère aucun risque pouvant engendrer un accident dans la zone du moule.

 Tous les convoyeurs visités se trouvaient sous la zone d'évacuation de pièces et/ou du côté opposé à l'opérateur, ce qui élimine les risques d'entraînement depuis le côté de l'opérateur. Ainsi, les convoyeurs ne nuisent pas aux essais de production qui se réalisent depuis le côté de l'opérateur.

Des moyens de protection et des dispositifs de sécurité existent afin de réduire le risque lié aux machines et à leur interaction. Ils rentrent aussi dans la composante « Équipement » de la situation de travail. Lorsqu'ils sont conçus adéquatement, ils fournissent la réduction du risque requise (cf. tableaux 2.14 à 2.16). Sinon, ils peuvent être source de danger pour le travailleur (voir les commentaires suivant chacun de ces tableaux).

Tableau 2.14 : Contribution des protecteurs pour la réduction du risque

Protecteur dans $\frac{x \text{ usines}}{4 \text{ usines}}$	Contribution pour la réduction du risque lié aux machines susmentionnées
Protecteur (mobile) de l'opérateur (3 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les éléments mobiles de la zone du moule et les projections de plastique ou gaz chaud ⚠ Ce protecteur doit avoir un dispositif de verrouillage
Protecteur (mobile) opposé à l'opérateur (3 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les éléments mobiles de la zone du moule et les projections de plastique ou gaz chaud ⚠ Ce protecteur doit avoir un dispositif de verrouillage
Protecteur de dessus (0 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les phénomènes dangereux de la zone du moule accessibles par le dessus
Protecteur fixe de la zone d'évacuation des pièces (2 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les phénomènes dangereux de la zone du moule accessibles par le dessous
Cage de protection contre le robot (2 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les mouvements du robot ⚠ Aux usines B et C, cette cage comprend une porte ; deux portes à l'usine D. Il est important que toutes les portes soient verrouillées ou interverrouillées, afin d'arrêter tout élément mobile avant une intervention dans la zone du moule.
Protecteur d'angle rentrant (2 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les risques d'entraînement dans un angle rentrant d'un convoyeur
Protecteur anti-coincement (1 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Protection contre les zones de coincement entre la courroie d'un convoyeur et son bâti

Tableau 2.14 : Contribution des protecteurs pour la réduction du risque (suite)

Protecteur dans $\frac{x \text{ usines}}{4 \text{ usines}}$	Contribution pour la réduction du risque lié aux machines susmentionnées
Gardes installés sur la passerelle (1 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du risque de chute en hauteur (entre autres, chute vers la zone du moule quand le protecteur de l'opérateur est ouvert)

⚠ Chacun de ces protecteurs doit empêcher l'accès à la zone dangereuse. Ce n'était pas le cas pour certaines visites :

- Les presses des usines A et D, contrairement aux autres usines, n'avaient pas de moyen de protection pour le dessus. Pour des zones du moule accessibles par le dessus (à l'aide ou non d'un escabeau ou escalier), mettre un protecteur de dessus, un dispositif de protection ou prolonger vers le haut les protecteurs de l'opérateur et celui opposé à l'opérateur. Évidemment, le moyen de protection tiendra compte de la nécessité pour un robot de récupérer des pièces par le dessus de la zone du moule.
- Il est arrivé, lors des visites qu'un opérateur récupère une pièce (échappée par le robot) en passant par la zone d'évacuation des pièces (cf. figure 2.13). Comme la chute d'évacuation était plutôt abrasive, elle ne favorisait pas la chute de la pièce. Il faudrait donc remplacer cette chute par une surface lisse et plus inclinée qui occupe l'ensemble de la zone d'évacuation. Globalement, pour empêcher l'accès à la zone d'évacuation, nous pouvons prolonger vers le bas le protecteur de l'opérateur et le protecteur opposé à l'opérateur, ou nous pouvons « rajouter une plaque sous la jupe de la presse » [7].

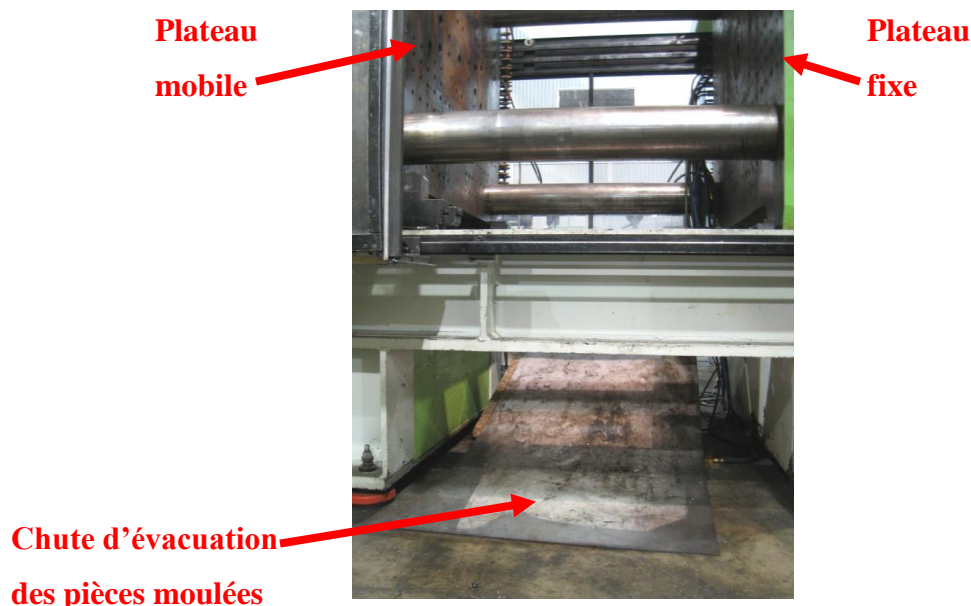


Figure 2.13 : Chute d'évacuation où s'est introduit le travailleur

Pour compléter la sécurité apportée par les protecteurs, des éléments du système de commande relatif à la sécurité peuvent être mis à contribution. Il s'agit des dispositifs de protection (cf. tableau 2.15), des dispositifs de sécurité (cf. tableau 2.16) et des composants dédiés à la sécurité (ex. : APIdS).

Tableau 2.15 : Contribution des dispositifs de protection pour la réduction du risque

Dispositifs de protection dans $\frac{x \text{ usines}}{4 \text{ usines}}$	Contribution pour la réduction du risque lié aux machines susmentionnées
Système de blocage mécanique du moule (ex. : barre de blocage mécanique) (2 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre, ce système arrête et empêche la fermeture accidentelle du moule
Tapis (planchers) sensibles (1 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> Lorsqu'on appuie sur le tapis sensible, il arrête et empêche le mouvement des éléments mobiles autour et dans la zone du moule (bras de robot, plateau mobile, éjecteurs, noyaux)

Tableau 2.15 : Contribution des dispositifs de protection pour la réduction du risque(suite)

Dispositifs de protection dans $\frac{x \text{ usines}}{4 \text{ usines}}$	Contribution pour la réduction du risque lié aux machines susmentionnées
Bordures sensibles installées sur le protecteur de l'opérateur (2 / 4)	Quand on appuie sur cette bordure, elle ordonne : <ul style="list-style-type: none"> • l'ouverture du protecteur motorisé, pour éviter le coincement de l'utilisateur entre ce protecteur et le bâti de la presse ; • l'arrêt et l'empêchement du mouvement des éléments mobiles autour et dans la zone du moule.

⚠ Le système de blocage mécanique du moule étant solidaire de l'ouverture du protecteur de l'opérateur, il était impossible, lors des essais réalisés durant les visites, de savoir si l'un ou l'autre ou les deux contribuaient effectivement à l'arrêt et l'empêchement du mouvement des éléments mobiles de la zone du moule et des équipements périphériques communiquant avec la presse.

⚠ Contrairement aux tapis sensibles fonctionnant avec des matériaux piézoélectriques, les tapis sensibles observés sont chacun formés d'une plaque rigide métallique sous laquelle se trouvent plusieurs interrupteurs de position électromécaniques (cf. figure 2.14). Au total, il y a environ 32 interrupteurs de position sous les tapis, d'après l'électromécanicien. Pour accroître la sécurité, il est prévu de créer un système qui rendra l'escabeau (cf. figure 2.14) solidaire du tapis sensible de manière à l'actionner lorsqu'on rentre dans la zone du moule en passant directement par l'escabeau plutôt que le tapis sensible. Ces tapis sont beaucoup plus robustes que les tapis piézoélectriques face aux chocs causés par les travailleurs qui sautent dessus.

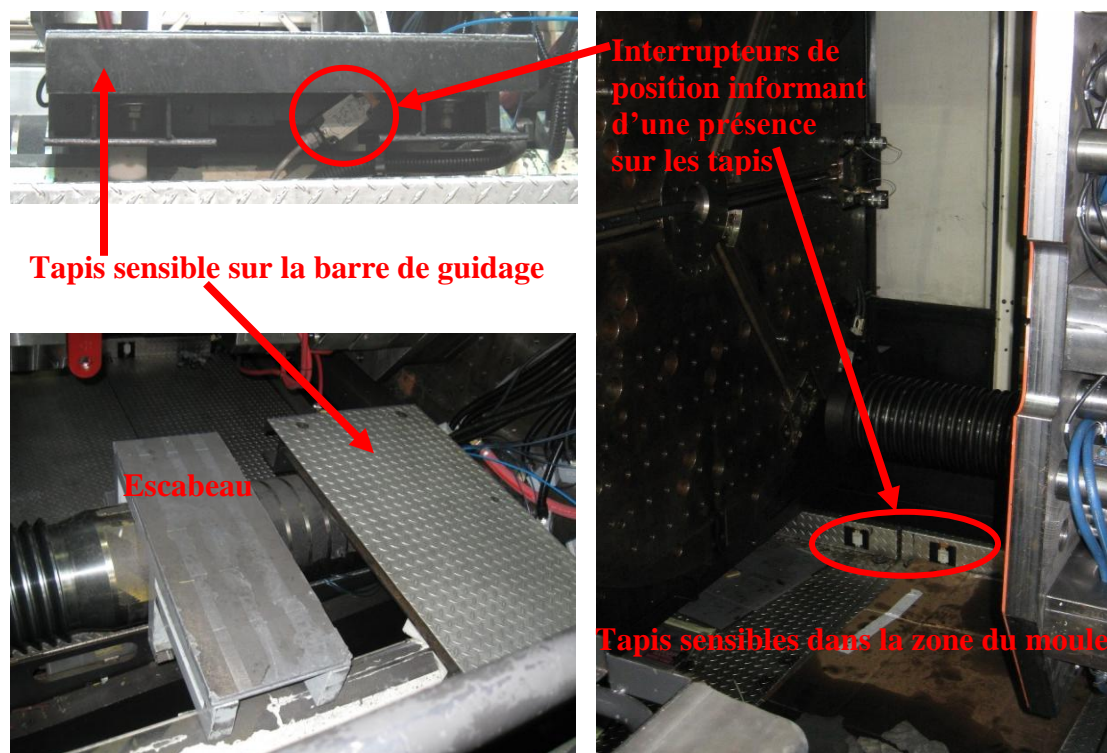


Figure 2.14 : Tapis (planchers) sensibles de la presse

- ⚠ Il est important de fixer les bordures sensibles sur le protecteur, pour éviter qu'elles ne se désengagent par inadvertance. Ainsi, elles joueront pleinement leur rôle de protection.
- ⚠ Les contraintes de production des usines ne nous ont pas toujours permis de réaliser des essais de fonctionnement des moyens de protection. Les quelques essais réalisés aux usines A et B, en mode automatique, semi-automatique ou manuel, nous ont permis de constater que ces moyens de protection arrêtaient et empêchaient, comme souhaité, le mouvement des éléments mobiles du système. Lorsque des essais n'étaient pas réalisés, les participants ont informé que les moyens de protection jouaient bien leur rôle lorsque sollicités en modes automatique, semi-automatique et manuel ; à l'exception du convoyeur de l'usine C qui s'arrête seulement en mode automatique.

Tableau 2.16 : Contribution des dispositifs de sécurité pour la réduction du risque

Dispositifs de sécurité dans $\frac{x \text{ usines}}{y \text{ usines}}$	Contribution pour la réduction du risque lié aux machines susmentionnées
Boutons d'arrêt d'urgence (4 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Augmente la possibilité d'éviter ou de limiter un dommage ⚠ Tout organe d'AU devrait : <ul style="list-style-type: none"> - être facilement accessible depuis la zone dangereuse (ex.: usage d'un BAU portatif aimanté) ; - être facilement remarquable ; - arrêter (une fois actionné) au moins tous les éléments mobiles du système « presse-périphérique(s) » ; - être rouge, non encastré, de type champignon et sur fond jaune.
Bouton de réarmement (3 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Confirme la volonté de redémarrer le système « presse-périphérique(s) » pour minimiser les démarrages indésirables • Réarmer la presse ne doit pas automatiquement mettre en mouvement des éléments mobiles du système
Interrupteur de position électromécanique (4 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Il ouvre le circuit à l'origine du phénomène dangereux, une fois que le protecteur auquel il est associé s'ouvre ⚠ Cet interrupteur doit être à ouverture forcée des contacts. Ainsi, au pire cas : les contacts se briseront s'ils sont soudés. Il doit être monté de manière à être difficilement contournable (ex.: montage en actionnement positif)
Vanne hydraulique (au moins 2 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Elle arrête la pompe hydraulique à l'origine du mouvement des éléments mobiles de la zone du moule, une fois que le protecteur auquel elle est associée s'ouvre
Limiteur de charge (au moins 1 / 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Si la charge dépasse la capacité du pont roulant, il ne démarre pas ou arrête sa course
Relais de sécurité (ratio inconnu)	<ul style="list-style-type: none"> • Il est à contacts guidés (ou liés) et coupe l'alimentation du circuit même si les contacts sont soudés

⚠ La plupart du temps, le protecteur de l'opérateur et celui opposé à l'opérateur étaient agencés aux interrupteurs de position électromécaniques selon le montage 1 de la figure 2.15.

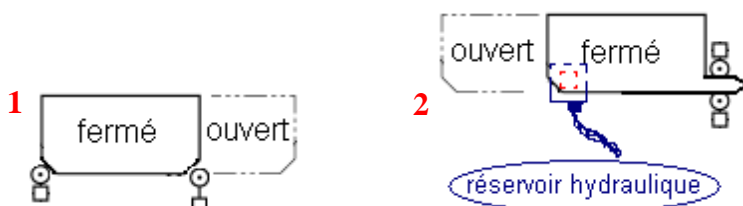



Figure 2.15 : Agencement « interrupteurs/vannes-protecteurs » observés lors des visites

Il est arrivé de voir des protecteurs de l'opérateur similaires au montage 2 de la figure 2.15. Le symbole «  » du montage 2 représente un détecteur de proximité inductif visant à couper l'alimentation de la vanne hydraulique du circuit, une fois ce protecteur ouvert. Un point positif est la redondance au niveau du système de verrouillage dont témoignent ces interrupteurs et vanne.

⚠ Des participants rencontrés lors des visites ne pouvaient confirmer si les relais observés étaient « de sécurité ». Un des participants, sachant ce que signifie « relais de sécurité », a informé que le relais en question n'était pas à contacts liés. Malgré cela, il a affirmé que le circuit auquel appartenait le relais était de catégorie 4. Or, pour satisfaire la catégorie 4 d'un circuit, l'ISO 13849-1 exige des composants éprouvés pour la sécurité, donc à contacts guidés dans le cas des relais. Cela soulève les lacunes préoccupantes de certains participants chargés de la sécurité des machines dans les usines : ils ont une idée des notions prônées par des normes, sans nécessairement les maîtriser.

Pour clore cette section sur la composante « Équipement » de la situation de travail, nous allons présenter des moyens de réduction du risque d'ordre de la prévention intrinsèque : les systèmes de commande relatifs à la sécurité. Les presses sont des machines pour lesquelles le système de commande contribue considérablement à la prévention des accidents [43]. D'ailleurs, l'utilisation des FS plutôt que du cadenassage durant la majorité des interventions dans la zone du moule abonde dans ce sens. Déjà

sans équipement périphérique, des risques élevés sont encourus sur des presses à injection de plastique horizontales [25]. Que dire de ces presses auxquelles on rajoute des équipements périphériques, donc des risques additionnels ? La coordination entre la presse et ses équipements périphériques, tout comme le système de commande relatif à la sécurité de ces machines doivent fournir le niveau de sécurité requis. Lors des visites en usines, les participants ont été interrogés sur différents aspects liés à la coordination et le système de commande relatif à la sécurité. Le tableau 2.17 informe des composants intégrés au système de commande de la presse et présente les auteurs de cette intégration.

Tableau 2.17 : Composants intégrés au système de commande des presses visitées

	Composants intégrés	Intégrateur
A	<ul style="list-style-type: none"> • Bloc de relais programmables et contacteurs additionnels (indépendants de l'API de la presse). • Installation d'un détecteur de proximité inductif sur la barre de blocage mécanique. <p>Résultat : $API_{\text{presse}} + \text{logique câblée}$</p>	Électromécanicien de l'usine
B	<ul style="list-style-type: none"> • API du robot : <p><u>Fonctionnement presse-robot</u> : le connecteur du robot assure la communication entre l'API du robot et celui de la presse. Il assure les coordinations fonctionnelles et de sécurité.</p> <p><u>Fonctionnement presse seule</u> : remplacer ce connecteur par une boîte électronique ayant des broches « pontées » (« jumper ») simule les conditions d'activation pour que la presse soit autorisée à fonctionner sans robot.</p> <p>N.B. L'intégration des dispositifs de verrouillage liés à la cage de protection contre les mouvements du robot est prévu plus tard dans l'usine.</p> <p>Résultat : $API_{\text{presse}} + API_{\text{robot}}$</p>	Fabricant de la presse et du robot (gestion de l'intégration par l'électromécanicien de l'usine)

Tableau 2.17 : Composants intégrés au système de commande des presses visitées(suite)

	Composants intégrés	Intégrateur
C	<ul style="list-style-type: none"> Interface du robot et dispositifs de verrouillage de la cage de protection. <u>Fonctionnement avec ou sans robot</u> : un bouton sélecteur rajouté permet de choisir le mode de fonctionnement du système : « presse-robot » ou « presse seule ». Interface du convoyeur pour que son fonctionnement ou son arrêt ne soit autorisé qu'en mode automatique. <p>Résultat : un API gérant le système « presse-périphériques »</p>	Fabricant de la presse et du robot
D	<ul style="list-style-type: none"> API du robot et dispositifs de verrouillage de la cage de protection. <u>Fonctionnement presse-robot</u> : deux connecteurs permettent au robot de communiquer avec la presse : un pour la coordination fonctionnelle et un pour la coordination de la sécurité. <u>Fonctionnement presse seule</u> : remplacer chaque connecteur par une boîte électronique similaire à celle de l'usine B (« jumper »). <p>Résultat : $API_{\text{presse}} + API_{\text{robot}}$</p>	Fabricant de la presse et fabricant du robot (collaboration entre les 2 fabricants + gestion de l'intégration par l'électromécanicien de l'usine)

L'intégration de ces composants a une incidence positive ou négative sur les moyens de protection initiaux ou le niveau de sécurité résultant du système « presse-périphérique(s) » (cf. tableau 2.18).

Tableau 2.18 : Influence de l'intégration sur les moyens de protection initiaux et la sécurité

	Changements aux moyens de protection initiaux	Impact sur la sécurité résultante
A	Aucun	Sécurité renforcée par la redondance de la vérification de l'ouverture du protecteur de l'opérateur : vérification faite par l'API et la logique câblée (2 technologies différentes).

Tableau 2.18 : Influence de l'intégration sur les moyens de protection initiaux et la sécurité(suite)

	Changements aux moyens de protection initiaux	Impact sur la sécurité résultante
B	Aucun	<p>La cage de protection empêche au travailleur d'être victime des risques du robot. Toutefois, cette cage n'étant pas verrouillée, un démarrage inattendu par un tiers peut surprendre un travailleur (situé dans la cage) non visible depuis la console.</p> <p>Activer l'arrêt d'urgence ou ouvrir les protecteurs de la presse arrêtent tous les éléments mobiles du système.</p>
C	<p>La cage de protection verrouillée prend le rôle du protecteur opposé à l'opérateur (ouvert en permanence).</p> <p>Quoique le participant interrogé ne puisse nous le dire, en lisant le manuel du fabricant de la presse, nous confirmons qu'il suffit de commuter trois interrupteurs pour substituer les entrées de sécurité provenant du protecteur opposé à l'opérateur par celles de la cage. L'ajout d'un robot était effectivement prévu dès la conception de la presse.</p>	<p>Le système de verrouillage de la cage assure la sécurité du travailleur, sauf dans ce cas : si la cage est fermée et qu'un travailleur traverse la zone du moule pour se rendre du côté opposé à l'opérateur (ex. : lors du montage de moule), un travailleur ne remarquant pas que son collègue est dans la cage, peut activer le mouvement du plateau mobile ou le robot.</p> <p>Activer l'arrêt d'urgence ou ouvrir les protecteurs de la presse arrêtent tous les éléments mobiles du système.</p>

Tableau 2.18 : Influence de l'intégration sur les moyens de protection initiaux et la sécurité (suite)

	Changements aux moyens de protection initiaux	Impact sur la sécurité résultante
D	<p>La cage de protection verrouillée prend le rôle du protecteur de l'opérateur (ouvert en permanence) et de son système de blocage mécanique. Une porte logique « OU » valide le fonctionnement de la presse ; ses entrées sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le protecteur de l'opérateur est fermé ; - les 2 portes de la cage sont fermées. 	<p>Le système de verrouillage de la cage assure la sécurité du travailleur, sauf dans ce cas : le système autorise au travailleur d'actionner le robot en mode manuel alors qu'il l'opère dans la cage avec ses portes fermées.</p>

À partir des échanges avec les participants, nous remarquons que la communication entre la presse et les composants intégrés s'entreprend selon trois configurations possibles. Les figures 2.16 à 2.18 les illustrent.

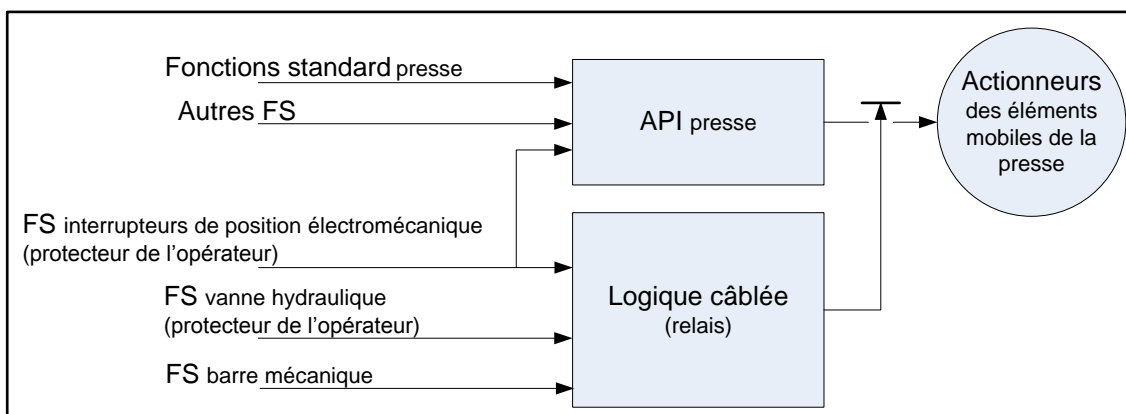


Figure 2.16 : Configuration retrouvée à l'usine A

Sur la figure 2.16, nous constatons que si l'API de la presse défaille dangereusement, les FS à son entrée ne seront pas exécutées, elles ne pourront donc pas arrêter et empêcher le mouvement des éléments mobiles. Heureusement que les fonctions de sécurité liées au protecteur de l'opérateur et à la barre de blocage mécanique passent par la logique câblée (cela crée une redondance). Si nous ouvrons ce protecteur, malgré la défaillance de l'API, les relais ouvriront le circuit, ce qui désactivera les actionneurs des éléments mobiles de la presse. Cette configuration est sécuritaire seulement par rapport aux FS du

protecteur de l'opérateur et de la barre de blocage mécanique : si nous actionnons l'arrêt d'urgence ou toute autre FS, rien ne s'arrêtera, car il fait partie de la catégorie « Autres FS » indiqué sur le schéma précédent. Le mieux serait de raccorder toutes les FS à la logique câblée, encore faut-il que ces FS restent simples.

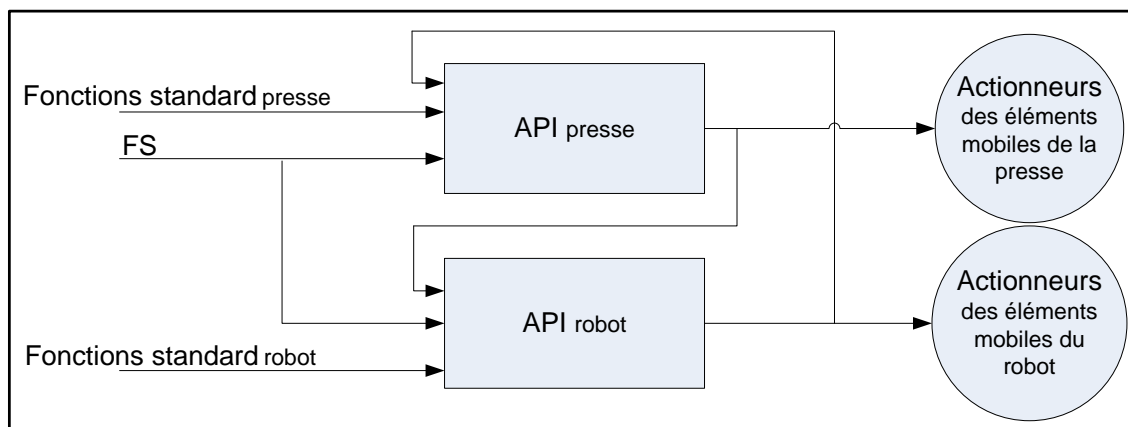


Figure 2.17 : Configuration retrouvée aux usines B et D

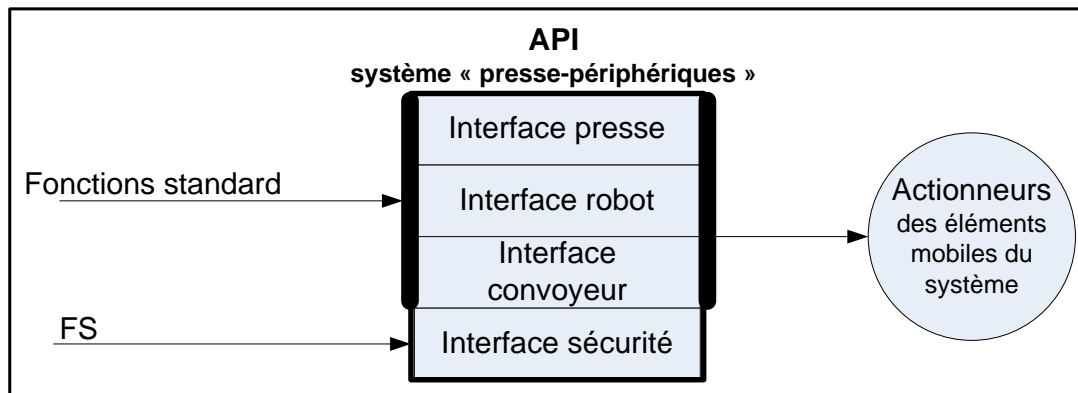


Figure 2.18 : Configuration retrouvée à l'usine C

Pour les raisons évoquées dans la revue de littérature, il est préférable de séparer le traitement des FS de celui des fonctions standard et d'utiliser une logique câblée pour les FS (cas de l'usine A). Cependant, lorsque le système à sécuriser est complexe et que le nombre des FS est considérable, un API_{FS} peut être utilisé [43], mais pas un API. Même si l'API_{FS} peut gérer à la fois les FS et les fonctions standard, il est préférable que toutes les FS soient gérées seules par l'API_{FS}. Malheureusement, les participants aux visites ne pouvaient confirmer si leur API était un API_{FS} : ce terme leur était méconnu. En tenant

compte des propositions de la littérature, les figures 2.19 et 2.20 suggèrent des améliorations en termes de sécurité, pour les configurations des usines B, C, D.

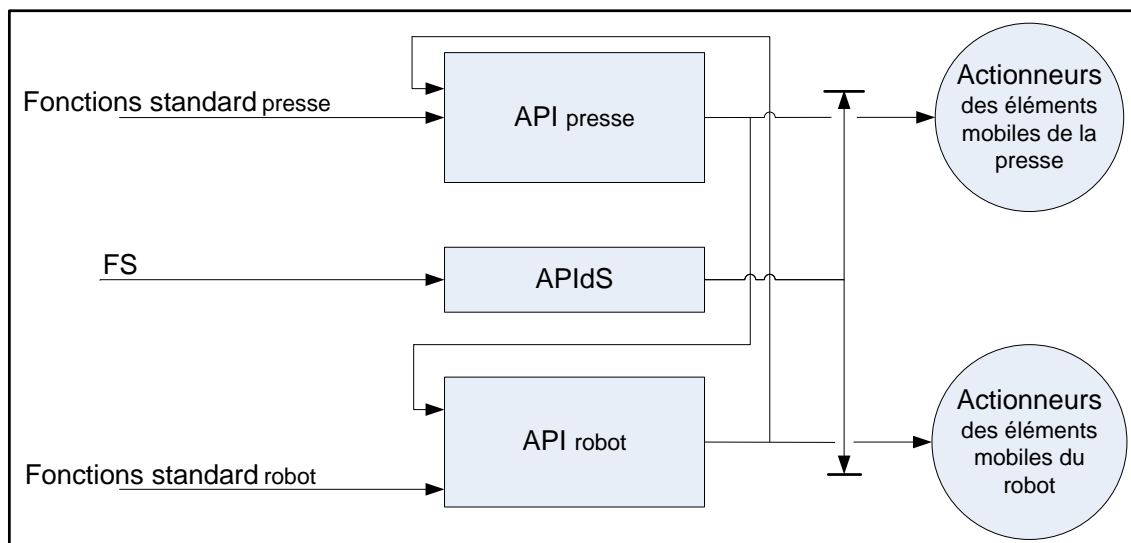


Figure 2.19 : Suggestion d'amélioration pour la configuration des usines B et D

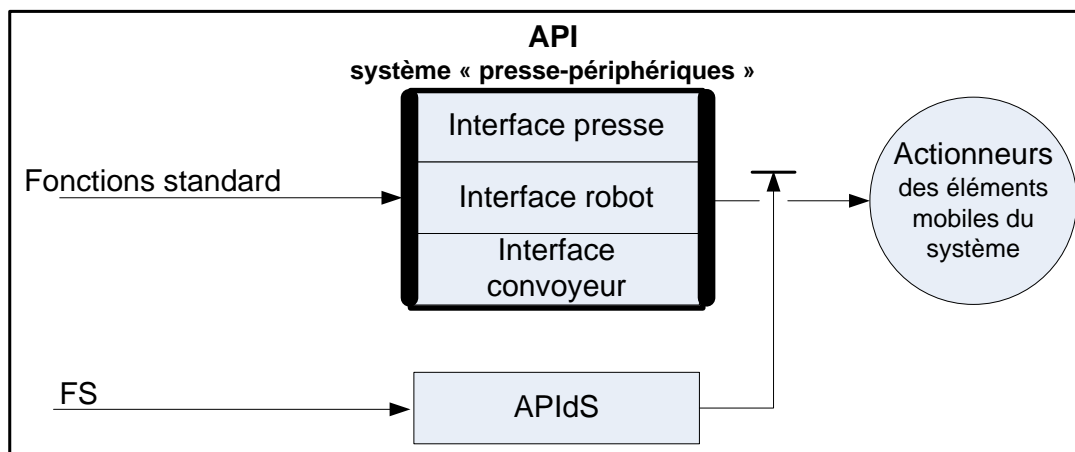


Figure 2.20 : Suggestion d'amélioration pour la configuration de l'usine C

Conseil aux intégrateurs et concepteurs de système de commande :

- ⚠ Documenter toute modification apportée au système de commande. Cela permet :
- de monter un dossier sur l'évolution du système de commande ;
 - à celui qui vous suivra, de comprendre votre circuit sur lequel il doit intervenir. Cela optimise le succès de ses travaux sur le circuit.

⚠ Lors de vos réflexions sur l'intégration ou la conception, ne pas vous arrêter aux plans existants du système [72]. Malheureusement, comme le suivi des modifications du système n'est pas toujours assuré, il est conseillé de vérifier si le câblage réel du système corrobore les informations de la dernière version des plans. Si ce n'est pas le cas, corriger le plan existant selon les révélations du câblage réel.

⚠ Séparez les FS des fonctions standard pour deux raisons :

- quand vous entreprenez des modifications sur le circuit des fonctions standard ou celui des FS, les changements apportés à l'un n'affecteront pas l'intégrité de l'autre. Ceci minimise la probabilité de défaillances à l'origine de commandes intempestives au niveau du circuit de sécurité et du circuit de la coordination entre la presse et ses équipements périphériques ;
- votre validation de la partie du système de commande traitant des FS devient facilitée, car elle n'est pas imbriquée dans celle traitant des fonctions standard.

Dans un même ordre d'idée, le chapitre 3 présente une démarche de validation *a posteriori* d'une FS d'une presse à injection de plastique horizontale, utilisée sans équipement périphérique. Ladite FS a été conçue selon le principe de logique câblée. Un API gère les fonctions standard de la presse. La partie traitant de la FS est donc dissociée de celle traitant des fonctions standard. Cette démarche consiste à estimer le niveau de performance d'une FS afin d'en évaluer la fiabilité.

Comme a dit Albert Einstein : « L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation de toute aventure technologique ». Dans notre contexte, cette citation montre l'importance de la prise en compte de la sécurité de l'humain dès la conception d'une technologie : la prévention intrinsèque. Le chapitre 3 sera l'occasion de sensibiliser les intégrateurs et concepteurs à l'importance d'adapter la fiabilité d'une FS d'une machine au niveau de réduction de risque requis pour l'utilisateur de la machine. Lors des visites, des participants rencontrés étaient conscients des dommages graves liés aux presses, mais ignoraient, ou ne maîtrisaient pas l'aspect validation de leur intégration ou conception. Ils prenaient pour acquis que les composants intégrés étaient

de telle catégorie, car il trouvait complexe de vérifier le niveau de catégorie réellement atteint, les normes existantes étant difficiles de compréhension et d'application selon eux. Certains intégrateurs rencontrés lors des visites (des électromécaniciens) ignoraient l'existence, la définition et l'importance de la notion « niveau de performance d'une fonction de sécurité » (notion permettant d'estimer la fiabilité d'une fonction de sécurité et de vérifier l'atteinte du niveau de réduction du risque requis). D'autres la connaissaient un peu, mais ignoraient comment estimer, *a posteriori*, le niveau de performance d'une fonction de sécurité. Cette constatation sur le terrain explique la raison d'être du chapitre 3 suivant.

CHAPITRE 3 ESTIMATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE D'UNE FONCTION DE SÉCURITÉ

Actuellement en sécurité des machines, il existe deux normes applicables à la sécurité des systèmes de commande [73, 74] :

- *NF EN 62061:2005 : Sécurité des machines - Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité ;*
- *NF EN ISO 13849-1:2008 : Sécurité des machines - Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité - Partie 1 : principes généraux de conception.*

Jusqu'au 31 décembre 2011, existait la norme suivante :

- *EN 954-1:1997 : Sécurité des machines - Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité - Partie 1 : principes généraux de conception.*

À cette date précise, elle fut annulée [75, 76] pour être remplacée par la NF EN ISO 13849-1:2008. Le principe des catégories (principe qualitatif [76]) qu'abordait l'EN 954-1:1997 fut repris par la *NF EN ISO 13849-1* qui l'enrichît d'une nouvelle notion : le niveau de performance [41]. Il existe 5 catégories, de la plus faible à la plus robuste : B, 1, 2, 3, 4. L'*EN 954-1* était « adaptée aux problèmes simples, résolus le plus souvent avec des composants simples et des logiques câblés » [77]. La *NF EN ISO 13849-1* va au-delà de l'*EN 954-1* par son approche probabiliste (quantitative) [41, 76] et sa prise en compte de la complexité croissante des dispositifs de sécurité qui « sont de plus en plus utilisés dans des chaînes de sécurité faisant appel à des automates programmables » [77]. BEQUINOR [76] abonde dans le même sens : l'*EN 954-1* s'appliquait à des machines simples, donc pourvues de peu de FS et de composants basiques ; tandis que l'application de la *NF EN ISO 13849-1* s'étend jusqu'aux machines complexes, alors formées de nombreuses FS faites de composants de sécurité sophistiqués, tels les APIs. Concentrons-nous donc sur les deux normes existantes : *NF EN ISO 13849-1* et *NF EN 62061*.

La *NF EN 62061* porte sur les systèmes de commande relatifs à la sécurité, mais uniquement électriques, électroniques et électroniques programmables. La *NF EN ISO 13849-1* s'applique aux parties électriques et non électriques des systèmes de commande relatives à la sécurité. Or, dans le cadre de l'étude, nous aurons à valider une FS d'une machine réalisée par des circuits électrique et hydraulique. La norme convenant à notre étude est donc la *NF EN ISO 13849-1*. Cependant, pour des combinaisons électrique – non électrique, la norme limite son application à des architectures bien précises appelées architectures désignées et à un niveau de performance maximal : PL = e. À titre de rappel, le PL est le « niveau discret d'aptitude de parties relatives à la sécurité à réaliser une fonction de sécurité dans des conditions prévisibles » [2]. Il existe 5 niveaux de performance (cf. tableau 3.1) correspondant chacun à une plage de PFH_d (probabilité moyenne de défaillance dangereuse par heure).

Tableau 3.1 : Intervalle de fiabilité correspondant au PL [2]

PL	a	B	c	d	e
PFH _d	[10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴ [[3×10 ⁻⁶ ; 10 ⁻⁵ [[10 ⁻⁶ ; 3×10 ⁻⁶ [[10 ⁻⁷ ; 10 ⁻⁶ [[10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁷ [

Dans la littérature, nous trouvons des exemples [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63] de l'application de l'*ISO 13849-1* (même de la *NF EN 62061* pour certains d'entre eux). Malheureusement, à eux seuls, ces exemples, laissent croire que l'estimation du PL s'entreprend uniquement à partir de la catégorie du système étudié et des paramètres : DC et MTTF_d, car la décision du PL n'y est prise qu'à partir de ces paramètres, parfois à partir de la CCF également. Or, comme précisé à la section 3.2.3, d'autres critères tout aussi importants doivent être considérés. De plus, il s'agit d'exemples abrégés de conception de système plutôt que de validation *a posteriori* du système. La validation *a posteriori* peut être utile pour approfondir un circuit avant d'intégrer des composants supplémentaires. Par souci d'éclairer et de guider les intégrateurs et concepteurs, cette partie du mémoire vise à estimer *a posteriori* le niveau de performance d'une FS d'une machine industrielle, pour faire ressortir les difficultés de l'exercice et proposer une démarche détaillée d'une telle estimation. Notez que cette

démarche s'inspire de celle suggérée par l'*ISO 13849-1* dans le cadre de la conception d'une FS.

3.1 Machine étudiée

La première étape de la démarche d'estimation *a posteriori* du PL d'une FS consiste à connaître la machine dont on veut valider la FS choisie. Cela implique qu'il faut avoir une bonne idée de son fonctionnement et connaître les types d'énergie en œuvre.

Dans notre cas, la machine étudiée est une presse à injection de plastique horizontale de force maximale de fermeture du plateau mobile valant 350 kN. Il s'agit d'une presse hydraulique et électrique située au laboratoire de sécurité des machines de l'IRSST. Son unité de plastification et d'injection, ainsi que son unité de fermeture comprennent des protecteurs fixes et mobiles. L'étude présentée dans ce chapitre concerne le protecteur de l'opérateur⁸, protecteur mobile verrouillé (c.-à-d., avec dispositif de verrouillage), protégeant l'utilisateur de la presse contre les phénomènes dangereux de la zone du moule.

⁸ N.B. Le protecteur de l'opérateur (cf. protecteur fléché de la figure 3.1) de la presse porte un couvercle mobile verrouillé sur le dessus. Ce couvercle est le protecteur du dessus ne faisant pas partie du protecteur de l'opérateur.



Figure 3.1 : Presse à injection de plastique horizontale de l'IRSST et son protecteur de l'opérateur [6]

3.2 Fonction de sécurité étudiée

Une fois la machine connue, la deuxième étape consiste à définir la FS à étudier. La norme *ISO 13849-1* décrit ainsi le terme « fonction de sécurité » : « fonction d'une machine dont la défaillance peut provoquer un accroissement immédiat du (des) risque(s) » [2]. D'après l'ISO/TR 23849:2010 [78], définir une FS consiste à la décrire (l'identifier et la spécifier), puis à en déterminer le niveau de performance requis conformément à l'*ISO 13849-1* (si nous utilisons la norme NF EN 62061, nous aurions à déterminer, de préférence, le niveau d'intégrité de sécurité, dit SIL). Ces aspects de la définition d'une FS sont développés dans les trois sous-sections suivantes.

3.2.1 Identification

Identifier la FS sert d'entrée en matière à la personne devant la valider : cela lui permet d'en avoir une vue générale.

Action de sécurité : arrêt du mouvement de fermeture du plateau mobile de la machine

Élément dangereux : plateau mobile

Déclencheur de l'action de sécurité : ouverture du protecteur de l'opérateur (protecteur du dessus exclu)

Condition de validité de la fonction : valide durant tout mode de fonctionnement.

Deux motifs expliquent le choix de cette FS :

- 1) **Elle épargne un dommage grave.** « Grave » signifie normalement irréversible au sens de l'article A.2.1 de l'*ISO 13849-1*. Effectivement, le mouvement de fermeture du moule est un phénomène dangereux associé à des dommages graves :
 - sur la presse à injection de plastique de l'IRSST, ce phénomène dangereux peut causer l'écrasement de parties du corps de l'opérateur qui se trouvent dans la trajectoire du mouvement de fermeture du plateau mobile ;
 - sur des presses de plus grandes dimensions, c'est le corps entier qui peut être écrasé dans cette trajectoire.

Dans les deux cas, l'écrasement peut être mortel. Ainsi, par cette FS déclenchée par la fonction de verrouillage du protecteur de l'opérateur, le concepteur veut réduire, entre autres, le risque d'écrasement de l'utilisateur de la machine entre les parties fixe et mobile du moule.

- 2) **Elle est simple et sa chaîne fonctionnelle peut être entièrement retracée.** Puisque la démarche appliquée dans cette étude consiste à servir d'exemple de validation architecturale d'une FS, il est préférable d'opter pour une FS simple

dont la chaîne entière peut être retracée. Obtenir le plus de données possible sur la chaîne permet de minimiser le nombre d'hypothèses de l'étude, ce qui facilite et optimise la justesse des résultats de la démarche. Dans notre cas, tous les composants impliqués dans la sécurité fonctionnelle ont pu être repérés, à partir des circuits hydrauliques et électromécaniques impliqués dans la réalisation de la fonction de fermeture du plateau mobile.

Une fois la FS identifiée, il faut la spécifier. Les spécifications permettent d'établir les frontières de la FS et de cerner ses caractéristiques. Ces dernières contribueront à cibler les composants de la machine intervenant dans la réalisation de la FS. L'action de ces composants sera étudiée lors de l'analyse des circuits relatifs aux énergies contribuant à la réalisation de la FS.

3.2.2 Spécification

La FS choisie se nomme : « arrêt et empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile par l'ouverture du protecteur de l'opérateur ». Le tableau 3.2 suivant présente ses spécifications.

Tableau 3.2 : Spécifications de la FS étudiée

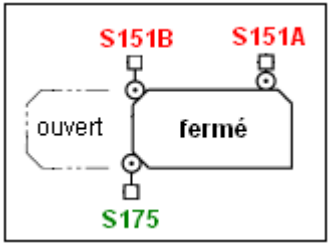
Conditions d'activation de la FS	Cette FS est activable en tout mode de fonctionnement de la presse.
Interface de la FS  <p>Figure 3.2 : Le protecteur de l'opérateur et ses interrupteurs actionnant le système de verrouillage du plateau mobile</p>	<p>Entrée : les trois interrupteurs du protecteur de l'opérateur (S151A, S151B et S175 ; cf. figure 3.2).</p> <p>Les contacts de S151A sont normalement ouverts. Ceux de S151B et S175 sont normalement fermés.</p> <p>Quand le protecteur de l'opérateur est fermé : S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés) ET S151A est enfoncé (contacts fermés) → Fermeture du plateau mobile autorisée.</p> <p>Il suffit qu'un de ces trois interrupteurs change de position (d'état) pour que la fermeture du plateau mobile soit empêchée. C'est ce qui se produit à l'ouverture du protecteur de l'opérateur.</p> <p>Sortie : le vérin qui fait bouger le plateau mobile par l'intermédiaire d'un mécanisme à genouillère (cf. vérin « V » de la figure 3.3).</p>
Description de la FS	Ouvrir le protecteur de l'opérateur, alors que le plateau mobile exécutait un mouvement de fermeture, arrête ce mouvement et empêche son redémarrage. Si après cet arrêt, on referme le protecteur, le mouvement de fermeture du plateau mobile sera autorisé.

Tableau 3.2 : Spécifications de la FS étudiée (suite)

Priorité par rapport à d'autres fonctions simultanées	<p>Cette FS est prioritaire sur toute fonction de commande standard de la presse (ex. : fonction de réarmement, commande standard de fermeture), à condition de ne pas être perturbée par un signal de la carte électronique programmable surveillant la commande Y511 d'un des distributeurs du vérin « V » (cf. figures 3.3 et 3.4).</p>
Autres FS agissant sur le même élément dangereux	<ul style="list-style-type: none"> • empêchement du mouvement du plateau mobile par son système de blocage mécanique ; • arrêt et empêchement du mouvement du plateau mobile par l'ouverture du protecteur de dessus (situé au-dessus de la zone du moule) ; • arrêt et empêchement du mouvement du plateau mobile par l'ouverture du protecteur du mécanisme de fermeture ; • arrêt et empêchement du mouvement du plateau mobile par l'ouverture du protecteur anti-éclaboussure supérieur de la buse ; • arrêt et empêchement du mouvement du plateau mobile par l'ouverture du protecteur d'accouplement de la vis ; • arrêt d'urgence de la presse.
Temps de réaction maximal de la FS	<p>Réaction instantanée : le mouvement de fermeture du plateau mobile s'arrête instantanément à l'ouverture du protecteur de l'opérateur. Ce qui justifie le recours au verrouillage, plutôt qu'à l'interverrouillage, pour cette FS.</p>

Parmi les spécifications, mentionner les autres FS agissant sur le même élément dangereux est important pour la personne qui effectuera la validation par essais et analyse. Cela la guidera lorsqu'elle devra vérifier que la FS concernée n'est pas perturbée par les autres FS agissant sur le même élément mobile.

3.2.3 Niveau de performance requis

Une fois la FS définie, il faut connaître son niveau de performance requis (PL_r) puisque la validation architecturale consistera à comparer le niveau de performance réel ($PL_{réel}$) de la FS étudiée à celui requis. D'après l'*ISO 13849-1*, le PL_r est le « PL permettant d'atteindre la réduction du risque requise pour chaque fonction de sécurité » [2]. Connaître le PL_r dès le début d'une démarche de validation architecturale, permet de cibler les critères à vérifier afin de valider la FS étudiée. En d'autres termes, connaître le PL_r oriente la suite de la démarche.

Le PL_r d'une FS d'une machine peut se trouver dans une norme de type C (cf. annexe 6). Sinon, le PL_r pourra être déterminé conformément à la méthode spécifiée à l'annexe A de l'*ISO 13849-1*. Cette méthode consiste en un diagramme de décision permettant d'estimer le PL qui permettra de rencontrer la réduction du risque requise. Selon ce diagramme, le PL_r se décide en fonction de : la sévérité du dommage, la durée d'exposition au phénomène dangereux et la probabilité d'évitement du dommage.

Dans notre cas, le PL_r correspondant à notre FS est précisé dans la norme de type C : *NF EN 201 : 2009 Machines pour les matières plastiques et le caoutchouc - Machines de moulage par injection - Prescriptions de sécurité* [25]. Cette norme stipule : « Lorsque le plateau mobile est entraîné par un actionneur hydraulique, les protecteurs avec dispositif de verrouillage doivent être conformes à l'Annexe C [annexe C de la norme] ou à la NF EN ISO 13849-1:2008, $PL_r = e$. » [25]. Puisque notre plateau mobile se déplace grâce à un vérin hydraulique et que la FS concerne le protecteur de l'opérateur verrouillé, le PL_r de la FS étudiée est « e ».

Remarque : La *NF EN 201 : 2009* établit un $PL_r = e$. Si nous nous basons sur la logique de l'*ISO 13849-1* : « Plus la réduction du risque effectuée par la SRP/CS est élevée, plus le PL_r doit être élevé. » [2]. Cela confirme que le risque au niveau de la zone du moule est important, tel qu'il a été mentionné à la section 3.2.1.

Une fois le PL_r connu, il faut inventorier les critères permettant de vérifier si le $PL_{réel}$ le satisfait. Afin de statuer sur le $PL_{réel}$ de l'ensemble des SRP/CS réalisant la FS, il convient d'estimer tous les points applicables ci-dessous, tel que l'exige l'article 4.5.1 de l'*ISO 13849-1* :

- le temps moyen avant défaillance dangereuse ($MTTF_d$) pour des composants uniques ;
- la couverture du diagnostic (DC) ;
- la défaillance de cause commune (CCF) ;
- la structure (architecture) de la ou de l'ensemble des SRP/CS réalisant la FS ;
- le comportement de la FS sous défaut(s) ;
- le logiciel relatif à la sécurité ;
- la défaillance systématique ;
- l'aptitude à exécuter une FS dans des conditions environnementales prévues.

Sachant que certaines catégories de sécurité n'exigent pas la prise en compte d'une DC, ni d'une CCF, il faut s'informer des catégories requises pour atteindre un certain PL_r , afin de savoir si l'estimation d'une DC et d'une CCF s'applique. Pour cela, il faut consulter le tableau 7 ou le tableau K.1 de l'*ISO 13849-1*. Ces tableaux présentent les conditions permettant d'atteindre un PL donné. En se basant sur le tableau 7 (tableau normatif), nous constatons que le $PL = e$ n'est atteint qu'avec la catégorie 4. Par ailleurs, le tableau K.1 (tableau informatif) et la figure 5 de la norme offrent des plages moins restrictives permettant d'atteindre le $PL = e$ avec la catégorie 3 ou 4. Le tableau K.1 donnant plus de latitude que le tableau 7 de la norme, utilisons le tableau K.1 pour préciser ces quatre critères : $MTTF_d$, DC, CCF et structure (architecture liée à une catégorie).

Du tableau K.1, nous déduisons que, pour satisfaire un $PL = e$, il faudra que la FS étudiée appartienne à l'un des deux groupes de critères suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} 62 \text{ ans} \leq MTTF_d \leq 100 \text{ ans} \\ DC_{avg} = \text{moyenne,} \\ \text{donc } 90 \% \leq DC_{avg} \leq 99 \% \\ \text{Catégorie 3} \end{array} \right. \quad \text{OU} \quad \left\{ \begin{array}{l} 30 \text{ ans} \leq MTTF_d \leq 100 \text{ ans} \\ DC_{avg} = \text{élevée} \\ \text{donc } DC_{avg} \geq 99 \% \\ \text{Catégorie 4} \end{array} \right.$$

Les SRP/CS de catégorie 3 ou 4 doivent rencontrer les exigences de l'*ISO 13849-1* résumées au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Critères de satisfaction des catégories 3 et 4

Catégorie 3 → Exigences	Catégorie 4 → Exigences
Résistance aux contraintes de fonctionnement prévues.	Résistance aux contraintes de fonctionnement prévues.
Résistance à l'influence des matériaux mis en œuvre.	Résistance à l'influence des matériaux mis en œuvre.
Résistance aux autres influences extérieures.	Résister aux autres influences extérieures.
Conception selon des principes de sécurité éprouvés.	Conception selon des principes de sécurité éprouvés.
Un défaut unique dans l'une de ces parties n'engendre pas la perte de la FS.	Un défaut unique dans l'une de ces parties n'engendre pas la perte de la FS.
Si raisonnablement réalisable, détection du défaut unique dès ou avant la prochaine sollicitation de la FS.	Détection du défaut unique dès ou avant la prochaine sollicitation de la FS.
	Si détection impossible, une accumulation de défauts non détectés n'engendre pas la perte de la FS.
DC _{avg} faible à moyenne : 60 % ≤ DC_{avg} ≤ 99 %	DC _{avg} élevée : DC_{avg} ≥ 99 %

Tableau 3.3 : Critères de satisfaction des catégories 3 et 4 (suite)

Catégorie 3 → Exigences	Catégorie 4 → Exigences
MTTF _d de chacun des canaux doit être d'indice faible à élevé : 3 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans	MTTF _d de chacun des canaux doit être d'indice élevé : 30 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans
Application des mesures contre les CCF : score ≥ 65.	Application des mesures contre les CCF : score ≥ 65.
Architecture désignée comprenant 2 canaux avec diagnostic.	Architecture désignée comprenant 2 canaux avec diagnostic.

Ainsi, nous venons de définir cinq des critères requis pour satisfaire le $PL_r = e$:

- le comportement de la FS sous défaut(s) ;
- le MTTF_d pour des composants uniques ;
- la DC ;
- la CCF ;
- la structure.

Maintenant, organisons les critères à vérifier, en ordre logique, afin d'orienter la suite de la démarche de validation :

1) recherche de l'architecture

- identification de la structure matérielle (ici, parties hydraulique et électromécanique) ;
- étude du comportement du circuit sous défaut, afin de comprendre la résistance du système aux défauts, pour distinguer les composants responsables du diagnostic de défauts de ceux responsables de la partie fonctionnelle) ;
- sélection de l'architecture désignée, à la lumière des résultats des 2 sous- points précédents ;

2) estimation du MTTF_d ;

3) estimation de la DC ;

4) estimation de la CCF ;

- 5) le logiciel relatif à la sécurité (**non applicable à notre cas, car aucun logiciel ne contribuera à la réalisation de la FS étudiée**) ;
- 6) la défaillance systématique ;
- 7) l'aptitude à exécuter une FS dans des conditions environnementales prévues.

Afin de connaître le comportement de la FS sous défauts, une analyse des circuits participant à la FS doit être effectuée :

1. une analyse purement fonctionnelle du circuit (ici, hydraulique) actionnant la fonction standard à laquelle s'oppose la FS. Cette analyse permet de distinguer les composants de la chaîne de la FS de ceux de la chaîne de cette fonction standard : fonction de fermeture du plateau mobile ;
2. une analyse du circuit (ici, électromécanique) à l'origine des commandes des préactionneurs sera faite en absence de défaut, afin de comprendre le fonctionnement normal du circuit ;
3. une analyse de ce circuit (électromécanique) sera également effectuée en présence d'un défaut. Cela permettra de vérifier deux des conditions des catégories 3 et 4 concernant : la non-perte de la FS en présence d'un défaut unique et le moment de détection de ce défaut.

Grâce à ces deux dernières analyses, il sera possible de distinguer les composants du circuit ne contribuant qu'à la partie fonctionnelle de la FS de ceux ne participant qu'à la partie diagnostic de défauts de la FS. Les trois types d'analyse susmentionnés sont présentés à la section 3.3.

3.3 Chaîne de la fonction de sécurité : identification et fonctionnement

Une fois que la FS est définie, que son PL_r est connu, ainsi que les critères permettant de l'atteindre ont été précisés, l'étape subséquente consiste à identifier la chaîne de la FS, puis à en analyser le fonctionnement.

La chaîne de la FS est composée de deux types d'énergie : hydraulique et électromécanique. La section 3.3.1 en présente le circuit hydraulique, la section 3.3.2, le

circuit électromécanique. Les analyses de circuits suivantes sont réalisées grâce aux plans et manuel du fabricant de la presse à injection de plastique horizontale de l'IRSST.

3.3.1 Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique intégral de la presse est présenté à l'annexe 7. Dans le cadre de l'étude, seule la partie du circuit intervenant sur le mouvement de fermeture du plateau mobile est utile. Nous nous restreignons alors au schéma de la figure 3.3.

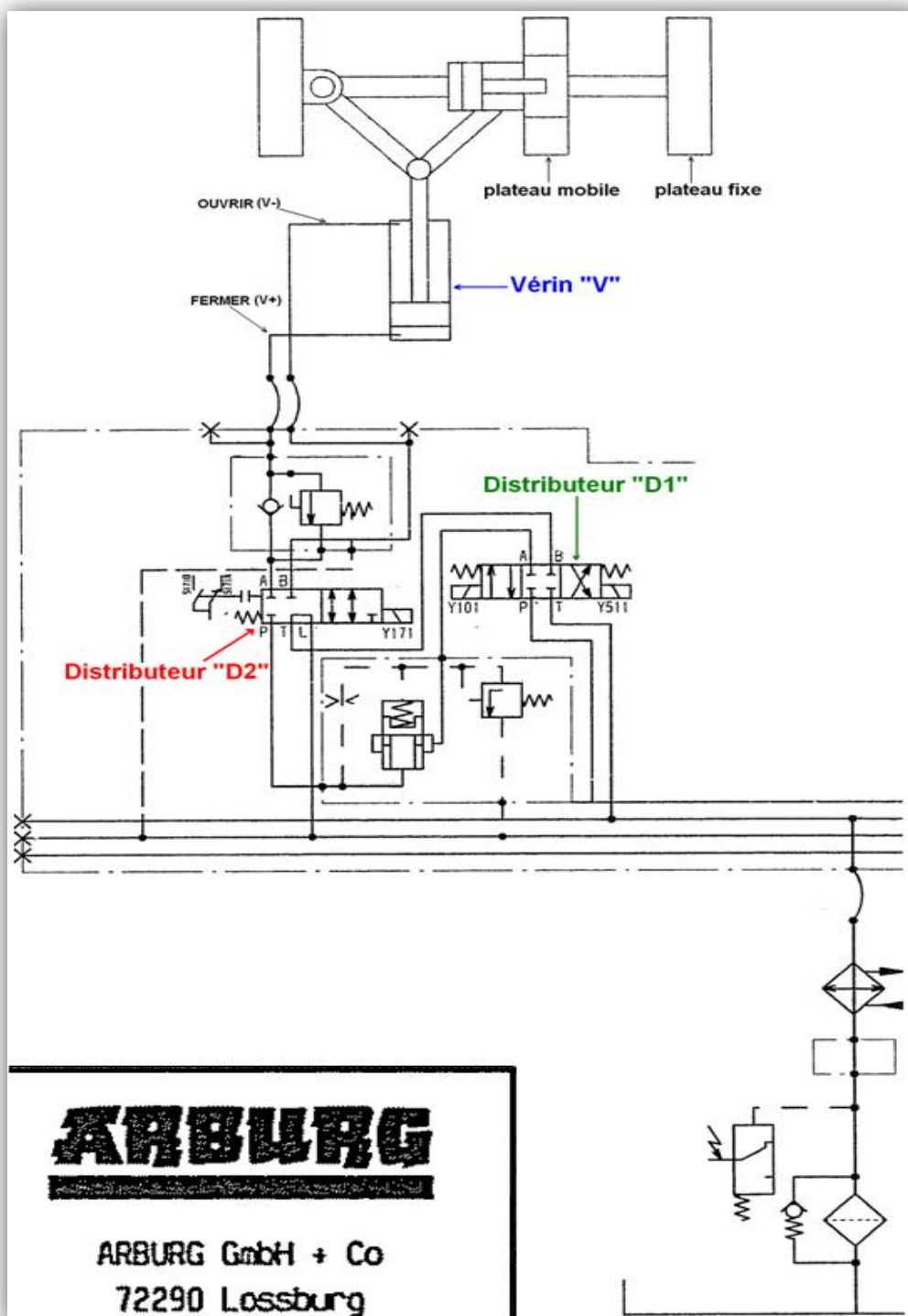


Figure 3.3 : Circuit hydraulique de l'unité de fermeture de la presse [79]

3.3.1.1 Circuit hydraulique : analyse

Analysons le circuit de la figure 3.3 afin de comprendre comment les mouvements de fermeture et d'ouverture du plateau mobile sont générés. Cette analyse permettra de distinguer les composants propres à la fonction standard d'ouverture de ceux propres à la fonction standard de fermeture. Elle permettra également d'identifier les composants dont la présence n'est pas indispensable à la réalisation de la fonction standard de fermeture (celle qui nous intéresse), et que nous pourrons donc négliger. À cette fin, le rôle de chaque composant du circuit hydraulique contribuant aux mouvements de fermeture et d'ouverture du plateau mobile de la presse de l'IRSST a été étudié (cf. annexe 8). Il est ressorti que le clapet antiretour, le limiteur de pression et le clapet piloté sont présents dans ce circuit pour rajouter de la souplesse au mouvement d'ouverture. Les enlever du circuit ne compromettra pas le mouvement de fermeture. Alors, dans les analyses subséquentes, nous ne tenons compte que du vérin « V » et des distributeurs « D1 » et « D2 », puisque notre FS ne concerne que le mouvement de fermeture du plateau mobile.

Le vérin « V » a un comportement binaire puisqu'il ne peut subir que deux ordres : soit celui de rentrer (V-) qui correspond au mouvement d'ouverture du plateau mobile, soit celui de sortir (V+) qui correspond au mouvement de fermeture du plateau mobile. Alors, analysons de plus près le circuit hydraulique en dressant la table de vérité permettant de trouver les équations logiques des ordres : V- et V+. Cette table a pour entrées les commandes électriques des distributeurs « D1 » et « D2 ». Il s'agit de : Y171, Y101 et Y511. Les sorties de la table de vérité sont les fonctions binaires : « OUVRIR » (V-) et « FERMER » (V+). Les valeurs 0 de la table définissent une entrée ou une sortie désactivée. Les valeurs 1 représentent une entrée ou une sortie activée. L'indication « - - - » signifie que c'est un cas indéterminé : la sortie peut valoir 1 ou 0.

Ainsi, dans notre cas trois entrées sont considérées, chacune acceptant deux valeurs : 0 ou 1 (voir l'annexe 9 pour un rappel sur les notions booléennes). Alors, nous aurons $2^3 =$

8 cas à étudier (cf. tableau 3.4 étant la table de vérité caractérisant les conditions d'activation des ordres « OUVRIR » et « FERMER » donnés au vérin « V »).

Tableau 3.4 : Table de vérité caractérisant les ordres « OUVRIR » et « FERMER »

	Entrées			Sorties (ordres)	
	« D2 »	« D1 »		« OUVRIR »	« FERMER »
	Y171	Y101	Y511	V-	V+
Cas 1	0	0	0	0	0
Cas 2	0	0	1	0	0
Cas 3	0	1	0	0	0
Cas 4	0	1	1	0	0
Cas 5	1	0	0	0	0
Cas 6	1	0	1	1	0
Cas 7	1	1	0	0	1
Cas 8	1	1	1	- - -	- - -

Les sorties de la table de vérité sont déduites à la lumière de l'analyse suivante du circuit, pour chacun des 8 cas répertoriés :

Cas 1 : Y171 = 0, Y101 = 0 et Y511 = 0

Puisque les trois commandes électriques par électro-aimant des distributeurs sont désactivées, il n'y a aucun aiguillage de pression hydraulique à travers le circuit. Aucun mouvement du plateau mobile n'est donc possible : $V+ = V- = 0$.

Cas 2 : Y171 = 0, Y101 = 0 et Y511 = 1

La commande Y511 est activée, tandis que la commande Y101 est désactivée. Alors, le tiroir du distributeur « D1 » translate à gauche de sorte que la pression hydraulique soit amenée de l'orifice P de « D1 » à son orifice B. Ensuite, l'huile hydraulique chemine de ce point B à l'orifice T du distributeur « D2 ». La commande électrique Y171 de « D2 » étant désactivée, aucun passage ne se crée par « D2 » pour acheminer l'huile hydraulique à la chambre avant du vérin. Il n'y a donc aucun mouvement : $V+ = V- = 0$.

Cas 3 : $Y_{171} = 0$, $Y_{101} = 1$ et $Y_{511} = 0$

Y_{101} est activée, alors le tiroir du distributeur « D1 » translate à droite de sorte que la pression hydraulique soit amenée de l'orifice P à l'orifice A de « D1 ». L'huile hydraulique chemine de A au clapet piloté, puis de ce clapet à l'orifice P du distributeur « D2 ». Cependant, la commande électrique Y_{171} de « D2 » étant désactivée, aucun passage ne se crée par ce distributeur pour acheminer l'huile hydraulique à la chambre arrière du vérin. Dans ce cas : $V_+ = V_- = 0$.

Cas 4 : $Y_{171} = 0$, $Y_{101} = 1$ et $Y_{511} = 1$

Les commandes Y_{101} et Y_{511} de « D1 » étant activées, un duel de commande peut subsister au niveau du distributeur. Cependant, la commande Y_{171} de « D2 » est désactivée. Puisqu'un de ces deux distributeurs en série est désactivé, il n'y aura aucun mouvement du vérin actionnant le plateau mobile. Alors : $V_+ = V_- = 0$.

Cas 5 : $Y_{171} = 1$, $Y_{101} = 0$ et $Y_{511} = 0$

Les commandes Y_{101} et Y_{511} de « D1 » sont désactivées. Ainsi, aucune pression hydraulique n'est acheminée au distributeur « D2 ». Quoique la commande Y_{171} de « D2 » soit activée, l'absence de pression hydraulique à l'entrée de « D2 » empêche le déplacement du vérin « V ». Alors : $V_+ = V_- = 0$.

Cas 6 : $Y_{171} = 1$, $Y_{101} = 0$ et $Y_{511} = 1$

Y_{511} est la seule commande activée de « D1 ». Alors, le tiroir du distributeur « D1 » translate vers la gauche de sorte que la pression hydraulique soit amenée de l'orifice P de « D1 » à son orifice B. Ensuite, l'huile hydraulique chemine de ce point B à l'orifice T du distributeur « D2 ». La commande Y_{171} de « D2 » étant activée, le tiroir de ce distributeur translate vers la gauche afin que l'huile hydraulique sous pression soit aiguillée de l'orifice T de « D2 » à son orifice B. Puis, cette huile est conduite à la chambre avant du vérin « V », afin de déplacer son piston vers sa chambre arrière. Ce déplacement crée un échappement d'huile par l'orifice de la chambre arrière. Cette huile

d'échappement passe par le limiteur de pression, puis par l'orifice A du distributeur « D2 ». La commande Y171 étant activée, le passage de l'huile sous pression est possible de ce point A à l'orifice P de « D2 ». L'huile poursuit son chemin de ce point P à l'orifice A du distributeur « D1 » en passant par le clapet piloté. Y511 étant activée, le passage de l'huile sous pression est possible de ce point A à l'orifice T de « D1 ». Une fois passée par ce point T, l'huile est ramenée au réservoir hydraulique. Conséquemment, le vérin « V » reçoit un seul ordre : « OUVRIR » correspondant à $V^- = 1$ et $V^+ = 0$. Le plateau mobile exécute ainsi son mouvement d'ouverture.

Cas 7 : Y171 = 1, Y101 = 1 et Y511 = 0

Y101 est la seule commande activée de « D1 ». Alors, le tiroir du distributeur « D1 » translate vers la droite de sorte que la pression hydraulique soit amenée de l'orifice P de « D1 » à son orifice A. Ensuite, l'huile hydraulique chemine de ce point A à l'orifice P du distributeur « D2 » en passant par le clapet piloté. La commande Y171 de « D2 » étant activée, le tiroir de ce distributeur translate vers la gauche afin que l'huile hydraulique sous pression soit aiguillée de l'orifice P de « D2 » à son orifice A. Ensuite, cette huile passe par le clapet antiretour, puis est conduite à la chambre arrière du vérin « V », afin de déplacer son piston vers sa chambre avant. Ce déplacement crée un échappement d'huile par l'orifice de la chambre avant. Cette huile d'échappement passe par l'orifice B du distributeur « D2 ». La commande Y171 étant activée, le passage de l'huile sous pression est possible de ce point B à l'orifice T de « D2 ». L'huile poursuit son chemin de ce point T à l'orifice B du distributeur « D1 ». Y101 étant activée, le passage de l'huile sous pression est possible de ce point B à l'orifice T de « D1 ». Une fois passée par ce point T, l'huile est ramenée au réservoir hydraulique. Conséquemment, le vérin « V » reçoit un seul ordre : « FERMER » correspondant à $V^+ = 1$ et $V^- = 0$. Le plateau mobile exécute ainsi son mouvement de fermeture.

Cas 8 : $Y171 = 1$, $Y101 = 1$ et $Y511 = 1$

Les deux commandes électriques de « D1 » et celle de « D2 » sont activées en même temps. Il est impossible de dire comment est traité ce duel :

- Si les deux commandes sont lancées au même instant « t », laquelle de ces deux commandes est prioritaire sur l'autre ? Ou, dans ce cas, le vérin reste-il immobile (aucun ordre envoyé) ?
- Si un délai de l'ordre du millième de seconde existe entre les deux commandes, comment est géré l'envoi de l'ordre d'actionnement du vérin ?

Dans pareil cas, les ordres donnés sont indéterminés : les commandes des deux distributeurs en série étant toutes activées, l'ordre « FERMER » aussi bien que l'ordre « OUVRIR » pourrait être autorisés. Une analyse du schéma électromécanique à l'origine des commandes des distributeurs permettra, si possible, de clarifier le traitement de ce duel de commande au niveau de « D1 ».

Reportons la table de vérité précédente dans deux tableaux de Karnaugh : le tableau 3.5 qui traduit l'ordre « OUVRIR » et le tableau 3.6 qui illustre l'ordre « FERMER ». Dans un tableau de Karnaugh, il faut absolument attribuer à chaque case un état 1 ou 0. Des états indéterminés ne sont pas admis [80]. Étant donné que notre cas indéterminé peut correspondre à l'un ou l'autre des deux ordres susmentionnés, nous attribuerons à chaque ordre un état activé (donc 1) dans chacun des tableaux de Karnaugh. Après avoir regroupé tous les 1 de chaque tableau de Karnaugh, nous en déduirons les équations logiques régissant les deux ordres.

N.B. Dans un tableau de Karnaugh, les 1 pouvant être regroupés sont ceux ayant une distance de Hamming de un bit [81]. De plus, le nombre de 1 formant un groupe doit correspondre à une puissance de 2 [82]. Par distance de Hamming de un bit, on entend des cases adjacentes entre elles et identifiées par des mots binaires de même longueur. Par exemple, les mots binaires « 00 » et « 11 » ne sont pas adjacents, car ils ont deux

bits différents entre eux. Cependant, les mots binaires « 01 » et « 11 » sont adjacents, car ils n'ont **qu'un bit différent** entre eux.

Tableau 3.5 : Tableau de Karnaugh de la fonction « OUVRIR »

V-	Y171		0	1
	Y101	Y511		
	0	0	0	0
	0	1	0	1
	1	1	0	1
	1	0	0	0

• « OUVRIR » :

En analysant le tableau de Karnaugh ci-contre, on réalise que $V- = 1$ (donc l'ordre « OUVRIR ») n'est autorisé que si : Y171 et Y511 sont activés et ce, peu importe l'état de Y101. Alors : $V- = Y171 \cdot Y511$ (1)

Tableau 3.6 : Tableau de Karnaugh de la fonction « FERMER »

V+	Y171		0	1
	Y101	Y511		
	0	0	0	0
	0	1	0	0
	1	1	0	1
	1	0	0	1

• « FERMER » :

En analysant le tableau de Karnaugh ci-contre, on réalise que $V+ = 1$ (donc l'ordre « FERMER ») n'est autorisé que si : Y171 et Y101 sont activés et ce, peu importe l'état de Y511. Alors : $V+ = Y171 \cdot Y101$ (2)

3.3.1.2 Circuit hydraulique : conclusions de l'analyse

Nous venons de déduire, d'un point de vue fonctionnel, les équations logiques des ordres « OUVRIR » et « FERMER ». Puisque notre FS ne concerne que la fermeture du moule, travaillons avec l'équation logique « (2) ». Ainsi, seuls les schémas liés aux commandes Y171 et Y101 sont désormais pris en compte dans l'étude.

En analysant l'équation (2), nous remarquons que :

1. L'action « FERMER » se réalise seulement si les deux commandes électriques Y171 et Y101 sont activées simultanément. L'action « FERMER » s'arrête dès qu'une de ces deux commandes se désactive. Ces constatations permettent de dire qu'il y a de la redondance hydraulique (deux distributeurs) au niveau de la fonction de fermeture du moule, puisque deux conditions doivent être validées pour ordonner l'action « FERMER ».

En effet, en observant le circuit hydraulique de la figure 3.3, nous réalisons que le distributeur « D1 » peut accomplir, à lui seul, les mouvements d'ouverture et de fermeture du plateau mobile. Cependant, pour des raisons de sécurité, le distributeur « D2 » a été rajouté : supposons que le plateau mobile ne s'ouvre et ne se ferme que par « D1 » et que « D2 » soit absent du circuit hydraulique. Imaginons que, dans pareil cas, la commande Y101 de « D1 » soit bloquée à 1 (c.-à-d., reste activée). Alors, la fermeture du plateau sera ordonnée et il sera impossible de contrer cette fermeture, même en ouvrant le protecteur de l'opérateur. Cette situation peut occasionner le coincement d'une partie corporelle d'un travailleur opérant dans la zone du moule. Il sera difficile de secourir ce travailleur alors que la commande Y101 persiste à être activée (la fermeture persiste). Cela laisse croire que le concepteur a ajouté le deuxième distributeur afin de contrer l'effet du blocage d'Y101 dans son état activé lors de l'ouverture du protecteur de l'opérateur. Effectivement, ouvrir le protecteur coupe l'alimentation du circuit de la commande Y171 de « D2 ». Ainsi, Y171 se désactive et arrête l'ordre de fermeture, malgré le défaut de Y101 (cf. figure 3.4), car selon la table de vérité, cet ordre n'est activé que si Y171 et Y101 sont activés simultanément.

2. Pour arrêter et empêcher le mouvement de fermeture, il faut désactiver au moins une des commandes (Y171 ou Y101) des préactionneurs : distributeurs « D1 » et « D2 ». Cela immobilisera le vérin « V ». Cette désactivation est effective en ouvrant le protecteur de l'opérateur. Alors, les composants de la partie opérative, pertinents à la réalisation de la fonction standard de fermeture sont ceux sur

lesquels il faut absolument agir pour arrêter et empêcher ce mouvement lors de l'ouverture du protecteur de l'opérateur. Ces composants sont le vérin « V », les distributeurs « D1 » et « D2 ».

Maintenant, cherchons à comprendre comment ces distributeurs hydrauliques sont commandés. La sous-section suivante explicitera la manière dont les commandes électriques de « D1 » et de « D2 » sont activées et désactivées.

3.3.2 Circuit électromécanique

Cette section identifie et explique le fonctionnement du circuit électromécanique à l'origine des commandes Y101 et Y171 des distributeurs hydrauliques. L'identification de ce circuit se réalise en :

- sélectionnant les schémas du fabricant, qui sont, à priori, pertinents pour l'étude : dans notre cas, tous les schémas électromécaniques liés à la commande standard de fermeture ont été répertoriés ;
- analysant les schémas répertoriés ;
- n'extrayant de cette analyse que les composants liés à la chaîne de la FS qui, ici, protège l'opérateur de la presse contre la fonction standard : le mouvement de fermeture.

Pour arriver à cette extraction, il faut : 1) comprendre le pourquoi de la présence des composants identifiés, 2) comprendre le fonctionnement de la chaîne intervenant dans la fonction standard : fermeture du plateau mobile et 3) distinguer de la chaîne standard, la chaîne de la FS. Il n'est pas toujours évident de réaliser ces trois points, car il faut souvent se mettre dans la peau du concepteur pour imaginer ce qu'il avait en tête au moment de penser sa machine. Dans le cadre de l'étude, des hypothèses (cf. section 3.5) sont posées lorsque la réponse à nos « pourquoi » ne vient pas du concepteur.

La figure 3.4 illustre la chaîne de la FS étudiée.

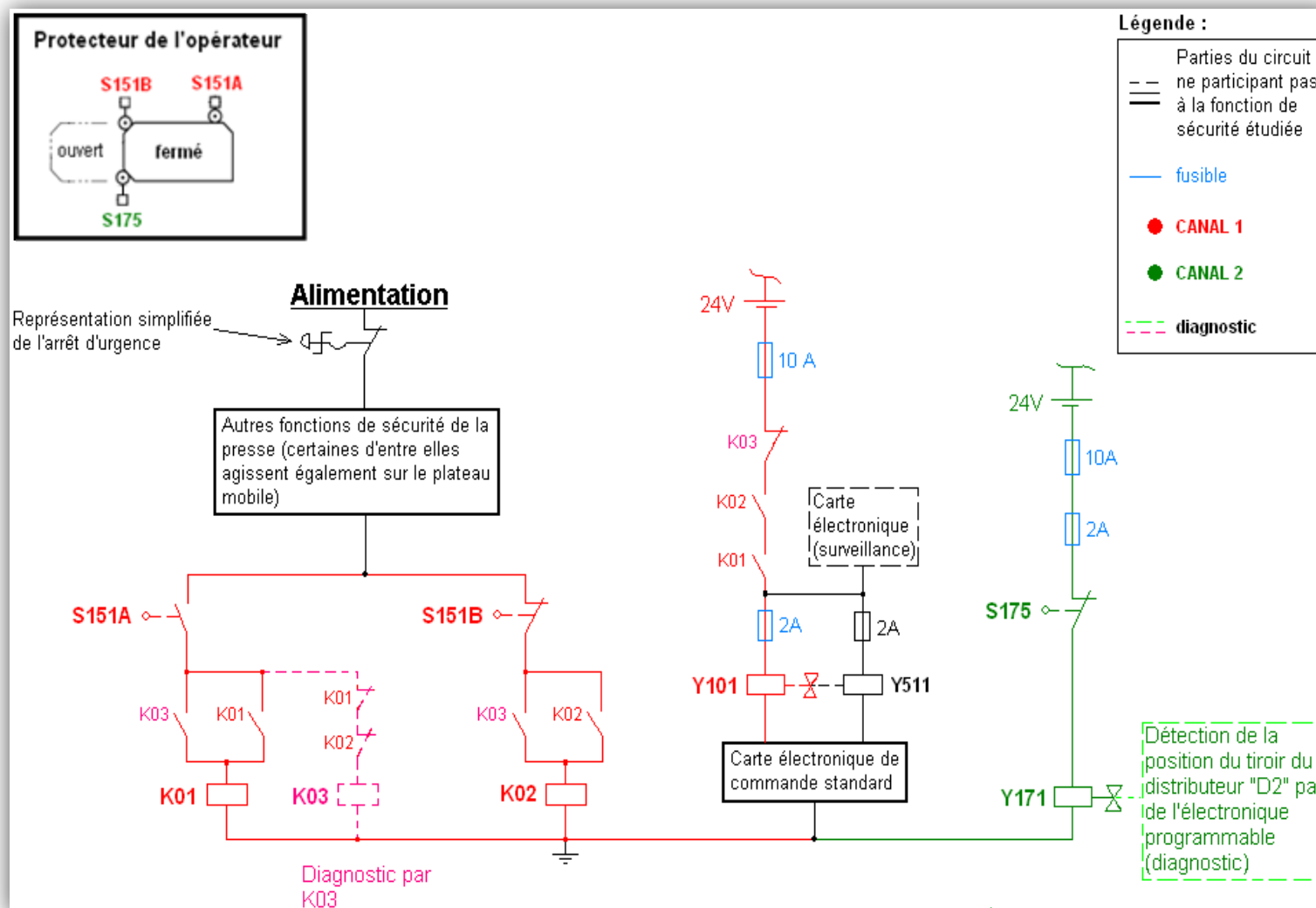


Figure 3.4 : Circuit électromécanique de la chaîne de la FS

Rappelons-le : pour que la FS atteigne le $PL_r = e$, il faut que sa structure soit de catégorie 3 ou 4. Or, ces deux catégories exigent qu'un défaut unique dans le circuit de la FS ne provoque pas sa perte. La satisfaction ou non de cette exigence est vérifiée plus tard lors de l'analyse du circuit de la FS en présence de défaut unique. Cependant, avant cette analyse, une analyse du fonctionnement normal du circuit doit être entreprise. Ces deux types d'analyse permettent ensuite de distinguer les parties fonctionnelles (canaux 1 et 2 montrés à la figure 3.4) des parties d'essai (diagnostic) du circuit de la FS (cf. figure 3.4). Cette distinction permet enfin de déterminer la structure de la FS.

3.3.2.1 Circuit électromécanique : fonctionnement normal

Cette section explique le fonctionnement du circuit électromécanique de la figure 3.4 en absence de défaut.

Contexte général de l'analyse : Aucune perturbation par d'autres FS. Aucun défaut n'existe dans le circuit de la figure 3.4. La fonction d'arrêt d'urgence est désactivée.

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (absence de défaut)

Contexte :

La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Or, d'après les spécifications de la FS étudiée (cf. section 3.2.2), quand le protecteur est fermé, les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés) et S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Par une analyse du circuit électromécanique, le tableau 3.7 explique les fonctionnements parallèles des commandes Y101 et Y171.

Tableau 3.7 : Fonctionnement normal avec protecteur de l'opérateur fermé

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>1. Les relais K01 et K02 sont désactivés, alors $K01 = 0$ et $K02 = 0$.</p> <p>2. Le relais K03 s'active, car</p> $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{0}$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 1$ <p>3. Le relais K01 s'active, car</p> $K01 = K03 + K01$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K01 = 1$ <p>De même pour K02, car</p> $K02 = K03 + K02$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K02 = 1$ <p>4. En raison de son équation logique d'activation, K03 tombe à 0 aussitôt qu'un des relais K01 ou K02 s'active.</p> <p>5. La commande Y101 du distributeur « D1 » s'active, car</p> $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 1 \cdot 1$ $= 1 \cdot 1 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 1$	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active. Alors, $Y171 = 1$, car l'interrupteur S175 a ses contacts fermés. Il achemine donc le courant électrique à Y171.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow FERMER = 1$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (absence de défaut)

Contexte :

La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre. Or, d'après la spécification de la FS étudiée, quand le protecteur s'ouvre, il suffit que la position d'un

des interrupteurs S151A, S151B ou S175 bascule pour empêcher le mouvement de fermeture du plateau mobile.

Fonctionnement du circuit analysé :

- Si S175 bascule en premier, les contacts de cet interrupteur s'ouvrent. Ainsi, faute de circulation de courant, Y171 se désactive. La fermeture du plateau mobile est arrêtée et empêchée (si le plateau mobile se fermait au moment d'ouvrir le protecteur) ou est empêchée uniquement (dans le cas où le plateau mobile était au repos au moment d'ouvrir le protecteur). La raison :

$$\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$$

$$= 0 \cdot 1$$

$$\rightarrow \text{FERMER} = 0$$

- Si S151A ou S151B bascule en premier, leurs contacts s'ouvrent. L'embranchement du circuit découlant de l'interrupteur qui bascule n'est plus alimenté, alors le relais K01 ou K02 se désactive. Ainsi, Y101 se désactive ; ce qui provoque l'empêchement et/ou l'arrêt du mouvement de fermeture du plateau mobile. La raison :

$$\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$$

$$= 1 \cdot 0$$

$$\rightarrow \text{FERMER} = 0$$

Évidemment, lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre complètement, tous les interrupteurs basculent et ouvrent leurs contacts respectifs. Ainsi, l'alimentation électrique est coupée au niveau de tous les embranchements de circuits découlant de ces trois interrupteurs. Alors, Y101 comme Y171 se désactivent. L'ordre « FERMER » n'est donc pas autorisé.

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (absence de défaut)

Contexte :

La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Au début de la fermeture du protecteur de l'opérateur, les contacts des trois interrupteurs ne sont pas nécessairement tous en position fermée. Alors, les commandes électriques Y101 et Y171 demeurent désactivées, tel qu'expliqué dans le cas II où le protecteur s'ouvre. Ce n'est que lorsque les contacts des trois interrupteurs se ferment que l'ensemble du circuit de la figure 3.4 est alimenté. Nous revenons alors au cas I (en absence de défaut) où le protecteur était fermé. Les commandes Y101 et Y171 sont toutes deux activées. Ainsi, la fermeture du plateau mobile est autorisée.

3.3.2.2 Circuit électromécanique : Fonctionnement en présence d'un défaut (analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE))

Des défauts peuvent survenir, simultanément ou non, au niveau du circuit d'une FS. Dans un premier temps, nous n'analysons que l'impact d'un défaut unique sur la FS et le moment de la détection de ce défaut. Rappelons que, pour les catégories 3 et 4 permettant d'atteindre un $PL = e$, le défaut unique doit pouvoir être détecté avant ou dès la prochaine sollicitation de la FS (cf. tableau 3.3). Dans le cas de la catégorie 4, si cette détection est impossible, il faut vérifier si l'accumulation de défauts non détectés ne provoque pas la perte de la FS. Vérifions, par l'analyse du circuit de la FS, en cas de défaut unique, si son aptitude est encore assurée.

Chaque composant du circuit de la figure 3.4 peut défaillir de deux manières : soit il reste activé, soit il reste désactivé. De tous les défauts répertoriés, il ne faudra retenir que ceux qui sont dangereux ou potentiellement dangereux. Les défauts potentiellement dangereux sont ceux qui sont susceptibles d'occasionner l'inaptitude de la FS, c.-à-d. qui peuvent activer les commandes Y101 ou Y171 des distributeurs hydrauliques. En d'autres termes, tout défaut contribuant à satisfaire une des conditions d'activation d'une

de ces deux commandes sera considéré comme étant potentiellement dangereux. Cette analyse en présence d'un défaut unique, permettra de déceler comment chaque défaut est diagnostiqué. De là, nous pourrons distinguer les composants participant de manière fonctionnelle à la réalisation de la FS de ceux y contribuant d'un point de vue surveillance ou diagnostic.

Les composants analysés en présence d'un défaut sont : les interrupteurs S151A, S151B et S175, les relais K01, K02 et K03, les commandes électriques Y101 et Y171. Aucune simulation de défaut n'est faite pour les interrupteurs : S151B et S175, car d'après le rapport R-557 [6] de l'IRSST sur la même presse à injection de plastique horizontale, ce sont des interrupteurs munis de contacts à ouverture forcée (donc des composants éprouvés) et montés en actionnement mécanique positif (donc installés selon un principe de sécurité éprouvé). Alors, d'après l'*ISO 13849-1*, l'exclusion de défauts s'applique à ces deux interrupteurs.

Contexte général de l'analyse : Aucune perturbation par d'autres FS. La fonction d'arrêt d'urgence est désactivée.

L'analyse complète du comportement de la FS en présence d'un défaut est explicitée à l'annexe 10.

3.3.2.2.1 Perturbations de la fonction de sécurité

Afin d'avoir une bonne idée de la vulnérabilité d'une FS, il est important de connaître les effets perturbateurs des parties de circuits autres, sur la chaîne de la FS. Dans le circuit électromécanique de la figure 3.4, les parties de couleur noire (à l'exception du bloc « Carte électronique de commande standard ») représentent des parties de circuits qui, par leur connexion au circuit de la FS, peuvent la perturber. L'emplacement du bloc « Carte électronique de commande standard » montre que la FS étudiée est prioritaire sur toute fonction de commande standard. Cependant, une condition demeure : il ne faut pas qu'un courant de fuite soit généré par la « Carte électronique (surveillance) ».

Influence du bloc « Carte électronique (surveillance) »

Si le protecteur de l'opérateur est ouvert et que la presse est alimentée, le courant de fuite mentionné précédemment continuera à s'injecter dans la commande Y101 de fermeture du distributeur « D1 » (embranchement rouge) et ainsi, l'activer. Si, en plus de cette activation, un défaut dangereux subsiste dans l'embranchement alimentant le distributeur « D2 » (embranchement vert) : S175 ou Y171 bloqué à 1, l'ordre de fermeture sera autorisé, malgré l'ouverture du protecteur de l'opérateur. Une étude approfondie de la « Carte électronique (surveillance) » n'a pu être entreprise, faute d'information du fabricant. Alors, le rôle de cette carte dans le circuit en termes de surveillance est inconnu. C'est la raison pour laquelle, lors du calcul de la couverture du diagnostic, une $DC = 0$ (donc le pire cas) est considérée pour la commande Y101.

Influence du bloc « Autres fonctions de sécurité de la presse (certaines d'entre elles agissent également sur le plateau mobile) »

Il se pourrait que les autres FS, en série avec l'arrêt d'urgence et la FS étudiée, perturbent cette dernière (certaines de ces autres FS sont citées au tableau 3.2). D'un point de vue architectural, ce bloc ne semble pas perturber la FS étudiée. Par ailleurs, dans le cadre d'une validation par essais et analyse, il sera intéressant de vérifier si des FS de ce bloc empêchent, donc perturbent, la FS étudiée.

Influence de l'arrêt d'urgence sur la chaîne de la FS étudiée

Contexte : Il n'y a qu'un défaut unique : S151A bloquée à 1.

Expliquons ce que chacune des étapes de la série d'actions suivantes implique sur le fonctionnement du circuit électromécanique de la figure 3.4 :

1. Ouvrir le protecteur de l'opérateur, alors que le mouvement de fermeture du plateau mobile est en cours et que l'arrêt d'urgence est non enclenché (le tableau 3.8 présente l'effet de l'étape 1 sur le circuit de la FS) ;

Tableau 3.8 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 1)

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
Malgré l'ouverture du protecteur, S151A = 1 à cause de son défaut. Alors, K01 = 1 (par automaintien) et, de ce fait, K03 = 0. S151B = 0, car ses contacts se sont séparés avec l'ouverture du protecteur de l'opérateur. Alors, K02 n'est plus alimenté : il se désactive. Ainsi, Y101 = 0.	La commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive. Aucune alimentation électrique ne lui parvient puisque S175 a ses contacts séparés par l'ouverture du protecteur : Y171 = 0.
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 0 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

2. Refermer le protecteur de l'opérateur alors que l'arrêt d'urgence est non enclenché (le tableau 3.9 présente l'effet de l'étape 2 sur le circuit de la FS) ;

Tableau 3.9 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 2)

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>1. K01 = 1, car S151A reste activé. Alors K03 = 0.</p> <p>2. K02 = 0, car il a été désactivé à l'étape 1 et aussi car K03 est désactivé :</p> $K02 = K03 + K02$ $= 0 + 0$ <p>3. Alors :</p> $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 1$ $= 1 \cdot 0 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$	Y171 = 1, car S175 a ses contacts fermés par la fermeture du protecteur de l'opérateur.
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

3. Enclencher l'arrêt d'urgence tout en gardant le protecteur de l'opérateur fermé ;

Enclencher l'arrêt d'urgence coupe l'alimentation électrique du circuit. Ainsi, tous les relais se désactivent ($K01 = K02 = K03 = 0$) et la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée ;

4. Désenclencher l'arrêt d'urgence tout en gardant le protecteur de l'opérateur fermé (le tableau 3.10 présente l'effet de l'étape 4).

Tableau 3.10 : Influence de l'arrêt d'urgence (étape 4)

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. Désenclencher l'arrêt d'urgence réalimente le circuit. 2. $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{0}$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 1$ 3. Alors, $K01 = K02 = 1$. 4. Ainsi, K03 se désactive. 5. $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 1 \cdot 1$ $= 1 \cdot 1 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 1$ 	<p>Y171 = 1, car S175 a ses contacts fermés par la fermeture du protecteur de l'opérateur.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow FERMER = 1$	

À travers la suite d'actions précédentes, nous remarquons que désenclencher l'arrêt d'urgence altère la capacité du relais K03 à diagnostiquer un défaut. Normalement, K03, par sa détection d'un défaut empêche la fermeture du plateau mobile, avant et après une sollicitation de la FS étudiée (cf. tableaux 3.8 et 3.9). Cependant, en enclenchant l'arrêt d'urgence, on empêche à K03 de « voir » le défaut. Alors, la machine peut fonctionner comme si de rien était. C'est pourquoi au tableau 3.10, nous constatons que le

mouvement de fermeture du plateau mobile est autorisé bien que le protecteur de l'opérateur soit fermé.

Pour que l'arrêt d'urgence n'influence aucunement cette FS, il aurait fallu que le concepteur fasse intervenir l'arrêt d'urgence directement sur les distributeurs « D1 » et « D2 », et non en passant par la chaîne des FS, dont celles agissant sur le même élément mobile : le plateau (cf. tableau 3.2).

L'arrêt d'urgence, tel que placé dans le circuit, passe par une série de FS avant d'atteindre les distributeurs. Si un court-circuit survient dans ces FS, alors que l'arrêt d'urgence est enclenché, il se peut que la fonction d'arrêt d'urgence perde son efficacité; ce qui n'est pas sécuritaire. Alors, raison de plus pour placer la fonction d'arrêt d'urgence directement à l'entrée des distributeurs.

3.3.2.3 Circuit électromécanique : Conclusions de l'analyse

Au cours de l'analyse en présence d'un défaut unique à l'annexe 10 de ce document, des défauts potentiellement dangereux sont répertoriés :

- S151A bloqué à 1 ;
- K01 bloqué à 1 ;
- K02 bloqué à 1 ;
- K03 bloqué à 0 ;
- Y101 bloquée à 1 ;
- Y171 bloquée à 1.

Supposons que la chaîne de la FS ne reçoit aucune perturbation des circuits voisins (ex. : circuit d'arrêt d'urgence). À la lumière de l'analyse précédente du circuit électromécanique, nous pouvons conclure que le cas d'un défaut unique lié à chaque SRP/CS du circuit ne contribue pas à la perte de la FS étudiée.

Cependant, une combinaison de défauts, tels Y101 et Y171 bloqués simultanément à 1, contribuera à la perte de la FS. De plus, ces défauts ne sont pas détectés par le système. Ce qui va à l'encontre d'un critère de la catégorie 4 définie dans l'*ISO 13849-1*.

Les défauts uniques (sauf ceux liés aux commandes Y101 et Y171) sont détectés avant et dès la sollicitation de la FS. Les défauts rattachés aux commandes Y101 et Y171 ne sont pas détectés.

Les analyses de défaut unique ont bien montré l'utilité d'une redondance hydraulique (commandes Y101 et Y171). Dans les cas où les défauts potentiellement dangereux provoquaient l'activation d'une de ces commandes, la fermeture du plateau mobile aurait pu être autorisée s'il n'y avait pas de redondance hydraulique. Comme il y a redondance, un défaut unique n'engendre pas la perte de la FS.

Les analyses du circuit électromécanique n'ont malheureusement pas permis de faire la lumière sur le traitement du duel soulevé lors de l'analyse hydraulique : l'activation simultanée des commandes Y101 et Y511.

Rôle du relais K03 dans le circuit

Remarquons qu'un circuit n'utilisant que les relais K01 et K02 pourrait générer la FS étudiée. En d'autres termes, si la commande Y101 était générée par l'équation logique : $Y101 = K02 \cdot K01$ (au lieu de : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$), en absence de défaut, la FS étudiée ne serait pas perdue. Cependant, en présence d'un défaut dangereux (ici, composant bloqué à 1) au niveau de l'embranchement de l'interrupteur S151A et au niveau de l'embranchement de l'interrupteur S151B, la FS serait perdue, contrairement à lorsque K03 est présent. Cette remarque montre que le relais K03 n'a aucun apport fonctionnel à la FS étudiée. Cela confirme que le relais K03 ne sert qu'à faire du diagnostic dans le circuit étudié.

Les défauts potentiellement dangereux suivants : S151A ou S151B bloqué à 1, K01 ou K02 bloqué à 1 sont diagnostiqués par K03. Si le diagnostic par K03 ne révèle aucune anomalie au niveau de ces quatre SRP/CS, l'activation de la commande électrique Y101 du distributeur « D1 » peut être ordonnée, donc autorisation de fermeture possible. Cependant, si K03 détecte un de ces défauts, cela engendrera la désactivation de Y101, donc l'arrêt ou empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile.

Après analyse, nous convenons que deux sous-chaînes fonctionnelles contribuent à l'exécution de la FS étudiée : une aboutissant à la commande Y101 du distributeur « D1 » et une autre, à la commande Y171 du distributeur « D2 ». Ces deux sous-chaînes

sont les deux canaux fonctionnels (au sens de l'*ISO 13849-1*) composant la chaîne de la FS étudiée.

CANAUx FONCTIONNELS : CANAL 1 ET CANAL 2

SRP/CS du canal 1 :

- interrupteurs : S151A et S151B ;
- relais : K01 et K02 ;
- commande électrique Y101 du distributeur « D1 ».

SRP/CS du canal 2 :

- interrupteur S175 ;
- commande électrique Y171 du distributeur « D2 ».

CANAL D'ESSAI

D'après l'analyse du circuit, un diagnostic est effectué pour vérifier la présence d'un défaut dans les canaux 1 et 2. D'après l'*ISO 13849-1*, la fonction consistant à entreprendre de la surveillance, c.-à-d. à diagnostiquer un défaut est réalisée par un « canal d'essai ». Ici, le canal d'essai est composé :

- **Pour le canal 1 :**
 - du relais K03 qui diagnostique les défauts de chaque composant du canal 1 (sauf les défauts de Y101) ;
 - d'une carte électronique programmable s'occupant de la surveillance de la commande Y101. Cependant, le traitement des données dans cette carte n'est pas accessible, alors le pire cas est considéré : $DC = 0$ pour la couverture du diagnostic fournie par cette carte à la commande Y101 ;
 - d'une carte électronique programmable qui semble permettre à l'utilisateur de la machine d'effectuer des vérifications du bon fonctionnement des interrupteurs des canaux 1 et 2. Nous avons constaté, sur les schémas

électriques de la presse, que les interrupteurs sont reliés à une carte électronique programmable de la presse. Malheureusement, le fabricant ne donne pas accès aux détails sur cette partie électronique programmable. La seule mention, à la section 1.2.2 du manuel du fabricant [79], de la possibilité de vérification du bon fonctionnement de ces interrupteurs via le panneau de commande de la presse, laisse croire que les interconnexions observées sur les schémas électriques, entre les interrupteurs et la partie électronique programmable sont liées à cette possibilité de faire de la vérification par le panneau de commande. Nous verrons plus tard que le relais K03 offre une couverture du diagnostic supérieure à celle que procure l'électronique programmable, alors seule la DC la plus grande sera considérée, donc celle de K03 ;

- **Pour le canal 2 :** d'une carte électronique programmable surveillant la position du tiroir du distributeur « D2 ». Tout comme pour les cartes électroniques programmables précédentes, le traitement des données au niveau de cette carte est inaccessible. Alors, le pire cas est considéré : $DC = 0$ pour la couverture du diagnostic fournie par cette carte à la commande Y171.

Avoir identifié deux canaux fonctionnels et un canal d'essai permet de déduire que la FS étudiée est réalisée par une architecture à 2 canaux (cf. figure 3.5), avec diagnostic de défauts. Ainsi, nous venons de vérifier un des critères requis pour les catégories 3 et 4. La figure 3.5 illustre l'architecture propre à la FS étudiée : les blocs liés représentent la partie fonctionnelle, les blocs isolés (« K03 » et « Électronique programmable ») représentent la partie diagnostic.

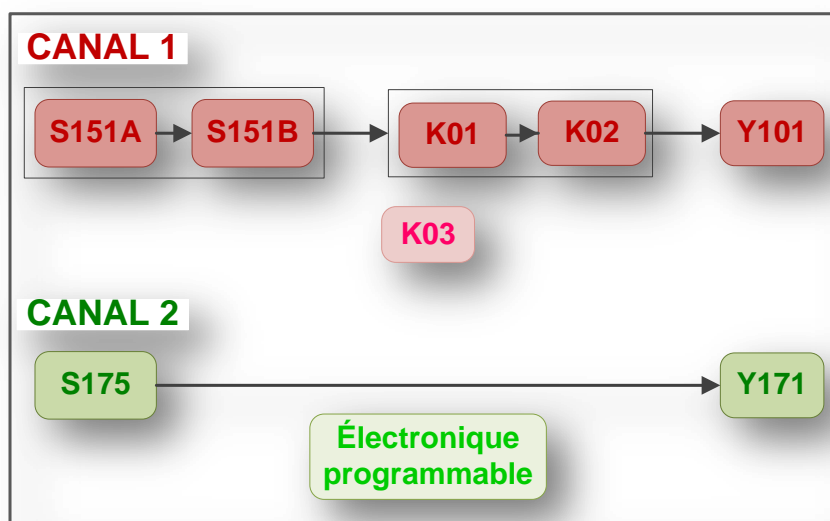


Figure 3.5 : Architecture propre à la FS étudiée

Tout comme dans le schéma électromécanique de la figure 3.4, l'interrupteur S175 et la commande Y171 sont en série dans le canal 2 de la figure 3.5. Cependant, contrairement à la figure 3.4 où les groupes : « S151A - K01 » et « S151B - K02 » sont en parallèle, remarquons que dans le canal 1 de la figure 3.5, ces 2 groupes sont en série entre eux et avec Y101. Important : il ne faut pas confondre la structure en parallèle de ces deux groupes dans le circuit électromécanique avec sa structure en série dans le canal 1 de l'architecture désignée qui elle, ne traduit que ce qui se passe d'un point de vue fiabiliste et sécuritaire. **Les composants d'un canal ne sont en série que si la défaillance dangereuse d'un des composants conduit à la défaillance du canal [2, 51].** Rappelons que notre FS, d'après ses spécifications (cf. section 3.2.2), consiste à arrêter le mouvement de fermeture du plateau mobile et à empêcher son redémarrage une fois que n'importe lequel des trois interrupteurs (S151A, S151B, S175) changent d'état. L'action d'ouvrir ou de garder ouvert le protecteur de l'opérateur provoque ce changement d'état. Rappelons aussi que l'ordre « FERMER » n'est donné que si la commande Y101 du canal 1 et la commande Y171 du canal 2 sont activées. Alors, une fois que S151A ou S151B change d'état par l'ouverture du protecteur, la commande Y101 du canal 1 est censée se désactiver aussi bien dès le début de l'ouverture du protecteur que durant son ouverture

complète. Dans notre cas, d'un point de vue purement logique (et non fonctionnel), puisque nous ignorons lequel des interrupteurs S151A ou S151B change d'état le premier lors de l'ouverture du protecteur de l'opérateur, étudions le comportement du canal 1 si un défaut unique survient au niveau d'un de ses composants :

- si S151A est le seul composant défaillant dangereusement ($S151A = 1$) et est l'interrupteur changeant d'état le premier par l'ouverture du protecteur, la commande Y101 restera activée malgré l'ouverture du protecteur. Il faudra attendre que l'interrupteur S151B change d'état pour que Y101 se désactive ;
- si le relais K01 est le seul composant défaillant dangereusement ($K01 = 1$) et que S151A est l'interrupteur changeant d'état le premier par l'ouverture du protecteur, la commande Y101 restera activée malgré l'ouverture du protecteur. Il faudra attendre que l'interrupteur S151B change d'état pour que Y101 se désactive ;
- inversement, si S151B est le seul composant défaillant dangereusement ($S151B = 1$) et est l'interrupteur changeant d'état le premier par l'ouverture du protecteur, la commande Y101 restera activée malgré l'ouverture du protecteur. Il faudra attendre que l'interrupteur S151A change d'état pour que Y101 se désactive ;
- si le relais K02 est le seul composant défaillant dangereusement ($K02 = 1$) et que S151B est l'interrupteur changeant d'état le premier par l'ouverture du protecteur, la commande Y101 restera activée malgré l'ouverture du protecteur. Il faudra attendre que l'interrupteur S151A change d'état pour que Y101 se désactive.

Ainsi, dans chacun des quatre cas précédents, durant un laps de temps, nous assistons à une défaillance dangereuse du canal 1 si au moins un de ces composants : S151A, S151B, K01, K02 défaille dangereusement. Finalement, si Y101 est défaillant dangereusement ($Y101 = 1$) le canal 1 sera défaillant tant et aussi longtemps que Y101 restera activé. **Ces deux dernières phrases expliquent pourquoi les composants du**

canal 1 sont en série. Une analyse similaire appliquée au canal 2 explique aussi pourquoi S175 et Y171 sont en série.

Si seulement un canal est défaillant dangereusement, l'autre canal non défaillant dangereusement assurera la réalisation de la FS. Pour causer une perte de la FS, il faut que les deux canaux défaillent dangereusement.

À ce stade de l'étude, faisons le point au tableau 3.11 afin de savoir où nous en sommes avec la satisfaction des exigences des catégories 3 ou 4. Dans ce tableau : « V » = vrai, « F » = faux, « V_h » = vrai par hypothèse, « ? » = information à chercher. Les affirmations « V » et « F » proviennent de l'analyse du circuit à la section 3.3.2.3.

Tableau 3.11 : Où en sommes-nous pour satisfaire les exigences des catégories 3 ou 4 ?

Catégorie 3 → Exigences		Catégorie 4 → Exigences	
Résistance aux contraintes de fonctionnement prévues.	V _h	Résistance aux contraintes de fonctionnement prévues.	V _h
Résistance à l'influence des matériaux mis en œuvre.	V _h	Résistance à l'influence des matériaux mis en œuvre.	V _h
Résistance aux autres influences extérieures.	V _h	Résister aux autres influences extérieures.	V _h
Conception selon des principes de sécurité éprouvés (ex. : actionnement mécanique positif des contacts des interrupteurs S151B et S171).	V	Conception selon des principes de sécurité éprouvés (ex. : actionnement mécanique positif des contacts des interrupteurs S151B et S171).	V
Un défaut unique dans l'une de ces parties n'engendre pas la perte de la FS.	V	Un défaut unique dans l'une de ces parties n'engendre pas la perte de la FS.	V
Si <u>raisonnablement réalisable</u> , détection du défaut unique dès ou avant la prochaine sollicitation de la FS.	V	Détection du défaut unique dès ou avant la prochaine sollicitation de la FS (« F », car non-détection des défauts liés aux commandes Y101 et Y171).	F

Tableau 3.11 : Où en sommes-nous pour satisfaire les exigences des catégories 3 ou 4 ?
(suite)

Catégorie 3 → Exigences		Catégorie 4 → Exigences	
		Si détection impossible, une accumulation de défauts non détectés n'engendre pas la perte de la FS (si Y101 et Y171 défaillent dangereusement → autorisation de fermeture du plateau → perte de la FS).	F
DC _{avg} faible à moyenne : 60 % ≤ DC_{avg} ≤ 99 %	?	DC _{avg} élevée : DC_{avg} ≥ 99 %	?
MTTF _d de chacun des canaux doit être d'indice faible à élevé : 3 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans	?	MTTF _d de chacun des canaux doit être d'indice élevé : 30 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans	?
Application des mesures contre les CCF : score ≥ 65.	?	Application des mesures contre les CCF : score ≥ 65.	?
Architecture désignée : 2 canaux avec diagnostic.	V	Architecture désignée : 2 canaux avec diagnostic.	V

Les critères vis-à-vis desquels «V_h» est inscrit concernent les exigences de la catégorie B (catégorie visant les exigences basiques de conception). Nous supposons que le concepteur les a respectés, puisqu'il s'agit d'une presse européenne. Pour que cette presse soit acceptée sur le marché européen, il faut qu'elle respecte au moins les exigences de santé et de sécurité de la directive « Machines » européenne qui inclut les exigences basiques de conception, telle la compatibilité électromagnétique (cf. annexe 11 pour de l'information sur cette directive).

Le tableau précédent confirme que la FS étudiée n'est pas de catégorie 4 : deux de ses critères vérifiés jusque-là ont la mention « F ». Nous poursuivrons le raisonnement en ne cherchant à vérifier que le reste des critères de la catégorie 3, car jusqu'à présent, ses exigences sont satisfaites.

Tel que mentionné à la section 3.2.3, la liste de critères ci-dessus guide la démarche de validation. Désormais, nous connaissons le chemin parcouru et celui restant à parcourir : il reste à calculer la DC_{avg} , le $MTTF_d$ et le score concernant les mesures contre la CCF.

3.4 Calculs pour la validation architecturale

Une fois l'analyse de la chaîne de la FS terminée, nous nous concentrons sur les calculs de validation architecturale. Ces calculs sont effectués en utilisant, dans un premier temps, le tableur *Excel* et, dans un deuxième temps, le logiciel SIStema [83] : « *Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications* », à des fins de vérification.

3.4.1 Contexte « laboratoire IRSST »

Sachant que la presse étudiée est utilisée dans le laboratoire « Sécurité des machines » de l'IRSST, nous calculons à l'annexe 13, le $MTTF_d$ et la DC_{avg} pour ce contexte nommé : « laboratoire IRSST » ou « labo. ». Nous obtenons un $MTTF_d$ élevé : 100 années et une DC_{avg} nulle : 19,64 %.

Les calculs entrepris pour ce contexte permettent de confirmer au tableau 3.12, la rencontre ou non de deux exigences, jusque-là manquantes, pour satisfaire la catégorie 3 : la DC_{avg} et le $MTTF_d$ (« V » = vrai, issu des calculs précédents ; « F » = faux).

Tableau 3.12 : Contexte « labo. » - Vérification des exigences de la DC_{avg} et du $MTTF_d$

Catégorie 3 → exigences pour les SRP/CS :	
DC_{avg} faible à moyenne : $60\% \leq DC_{avg} \leq 99\%$	F
Le $MTTF_d$ de chacun des canaux redondants doit être d'indice faible à élevé : $3 \text{ ans} \leq MTTF_d \leq 100 \text{ ans}$	V

Ce tableau montre que pour le contexte « labo. », la FS ne satisfait pas la catégorie 3. Le $PL_r = e$ n'est donc pas satisfait. De même, la FS ne satisfait pas les catégories inférieures :

- la catégorie 2 exige une DC_{avg} minimalement faible. Or, la nôtre est nulle ;

- les catégories 1 et B exigent un seul canal fonctionnel. Or, nous en avons deux.

Ceci dit, nous ne pouvons pas statuer sur le $PL_{réel}$ de la FS pour le contexte « labo. ».

3.4.2 Contexte « usine »

Par ailleurs, comme une telle presse n'a pas été conçue pour fonctionner aussi rarement que dans le contexte « labo. », mais plutôt dans un contexte manufacturier, trouvons les paramètres de la FS pour un contexte d'utilisation fréquente de la machine dans une usine du Québec. Les calculs du contexte « usine », effectués à l'annexe 13, nous donnent un $MTTF_d$ élevé : 100 années et une DC_{avg} moyenne : 98,43 %.

Les calculs entrepris pour le contexte « usine » permettent de confirmer au tableau 3.13 la rencontre de deux exigences, jusque-là manquantes, pour satisfaire la catégorie 3 : la DC_{avg} et le $MTTF_d$ (« V » = vrai, issu des calculs précédents).

Tableau 3.13 : Contexte « usine » - Vérification des exigences de la DC_{avg} et du $MTTF_d$

Catégorie 3 → exigences pour les SRP/CS :	
DC_{avg} faible à moyenne : $60 \% \leq DC_{avg} \leq 99 \%$	V
Le $MTTF_d$ de chacun des canaux redondants doit être d'indice faible à élevé : $3 \text{ ans} \leq MTTF_d \leq 100 \text{ ans}$	V

La catégorie 3 étant satisfaite, nous pouvons passer à une autre étape : la vérification des exigences pour contrer les CCF.

MESURES CONTRE LES DÉFAILLANCES DE CAUSE COMMUNE (CCF)

Les défaillances de cause commune sont des « défaillances qui affectent plusieurs entités à partir d'un même événement et qui ne résultent pas les unes des autres » [2]. Les critères rencontrés par la FS en termes de mesures contre les CCF (cf. tableau 3.14) ont été retenus à partir du tableau F.1 de l'*ISO 13849-1* [2]. Pour satisfaire la rencontre des mesures contre les CCF, il faut obtenir un score supérieur ou égal à 65 comme le précise le tableau F.2 de l'*ISO 13849-1* [2]. Ces mesures sont indépendantes du contexte d'utilisation de la machine.

Tableau 3.14 : Mesures contre les défaillances de cause commune

Mesures contre les défaillances de cause commune	Score
Séparation au niveau du câblage : les circuits de sécurité sont indépendants des circuits de fonctionnement (logique câblée séparée de la logique électronique programmable de la presse)	15
Différents principes de conception, de technologies ou de principes physiques sont utilisés : <ul style="list-style-type: none"> - le circuit électromécanique est en logique câblée ; - utilisation de redondance au niveau hydraulique (distributeurs « D1 » et « D2 ») et au niveau électromécanique (relais K01 et K02). Provenance de fabricants différents pour les composants de la FS (d'après les indications sur la presse : interrupteurs de marque <i>Moeller</i> , relais de marque <i>Hengstler</i> , distributeur D1 de marque <i>Rexroth</i> et distributeur D2 de marque <i>Bosch</i>).	20
Les fusibles représentés sur le circuit électromécanique montrent qu'il est protégé contre les surintensités de courant. Limiteur de pression dans le circuit hydraulique.	15
Des composants éprouvés sont utilisés : <ul style="list-style-type: none"> - interrupteurs à ouverture forcée des contacts : S151A, S151B, S171 ; - relais à contacts guidés (contacts liés) : K01, K02, K03. 	5
Notre AMDE permet de déduire, par la présence du relais K03, que le concepteur a dû prendre en compte les résultats d'une AMDE pour prévenir des CCF à la conception. En effet, la présence de K03 empêche des CCF telles que : l'activation erronée du relais K01 due au blocage à 1 de l'interrupteur S151A, malgré l'ouverture du protecteur de l'opérateur.	5
Comme la presse étudiée est une presse européenne, nous supposons que le fabricant a respecté les principes de base portant sur l'environnement de la machine (principes couverts par la catégorie B). Nous savons qu'au moins un filtre se trouve dans le circuit hydraulique de la fonction de fermeture (cf. figure 3.3).	5
TOTAL	65

Afin de statuer sur un niveau de performance réel de la machine, il faut satisfaire deux autres critères : la défaillance systématique et l'aptitude de la SRP/CS à exécuter une FS dans des conditions environnementales prévues. N'ayant pas d'informations suffisantes du concepteur pour vérifier la rencontre de ces deux critères, et comme le but de

l'exercice est de faire ressortir les difficultés d'une telle démarche d'estimation *a posteriori* du PL d'une FS et de suggérer une méthode (démarche) d'estimation, prenons pour hypothèse que le concepteur a bien vérifié ces deux critères. Ainsi, nous pouvons passer à l'estimation du niveau de performance réel de la machine.

Somme toute, dans le contexte « usine », la FS étudiée satisfait la catégorie 3, le score minimal des mesures pour contrer les CCF est atteint, la défaillance systématique est prise en compte (par hypothèse) et la FS en question est supposée apte à s'exécuter dans des conditions environnementales prévues. Alors, en consultant le tableau K.1 de la norme, nous pouvons statuer sur le niveau de performance réel de la machine pour le contexte « usine » : $PL_{réel} = e$, donc satisfaction du PL_r . D'après l'ISO 13849-1, la PFH_d correspondant à ce PL est comprise entre 10^{-8} et 10^{-7} . Cette plage attribue donc à la FS étudiée une fiabilité importante pour le contexte « usine ».

3.4.3 Estimation vérifiée sur logiciel

D'après l'article « *Trois outils logiciels pour évaluer ses boucles de sécurité* » [75], trois logiciels existent afin de « faciliter la vérification fonctionnelle selon les normes EN/CEI 62061 ou EN ISO 13849-1 ». Cependant, ces logiciels ne peuvent se substituer aux normes. Les utiliser nécessite une bonne compréhension des normes et une utilisation réfléchie de l'outil logiciel. Il s'agit des logiciels suivants :

- 1) *SIStema* [83] de l'IFA (Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance) ;
- 2) *PAScal* de Pilz ;
- 3) *Safety Evaluation Tools (SET)* de Siemens.

Le tableau 3.15 dresse un portrait de ces trois outils, inspiré de l'article susmentionné.

Tableau 3.15 : Survol des trois outils logiciels

Logiciel	Calculs selon l'ISO 13849-1	Calculs selon la CEI 62061	Possibilité de documenter la FS	Facilitation des calculs et de la validation de la FS	Gain de temps par rapport à un tableur ou un calcul à la main	Évitement d'erreur de calcul	Bases de données de composants disponibles	Possibilité de créer sa propre base de données de composants	Outil graphique	Possibilité d'exclure des défauts	Utilisation en ligne (gratuit)	Utilisation de la version de démonstration (téléchargement gratuit)	Utilisation de la version intégrale (licence requise)	Utilisation de la version intégrale (téléchargement gratuit)
SISStema	×		×	×	×	×	×	×	×	×				×
PAScal	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	
SET	×	×	×	×	×	×	×	×			×			

Au moment de l'étude, l'INRS (lieu où a été entreprise l'estimation du PL) ne disposait que du logiciel *SISStema*. De plus, l'équipe SSA de l'INRS voulait savoir si ce logiciel pouvait être utilisé sans connaître la norme *NF EN ISO 13849-1*. Pour ces deux raisons, dans le cadre de l'étude, l'estimation du PL est vérifiée avec l'outil logiciel *SISStema*. Pour la vérification, seules les valeurs ou informations des paramètres suivants sont rentrées dans le logiciel :

- PL_r ;
- DC de chaque composant ;
- Exclusion de défauts ;
- $MTTF_d$ de chacun des composants concernés (lorsque connu d'avance) ;
- B_{10d} de chacun des composants concernés ;
- d_{op} ;
- h_{op} ;
- t_{cycle} ;
- CCF ;
- Catégorie.

Lorsque non connue d'avance, la valeur du $MTTF_d$ de chaque composant est calculée automatiquement par le logiciel, à partir des paramètres : B_{10d} , d_{op} , h_{op} , t_{cycle} . Le $MTTF_d$ de chaque canal, la DC_{avg} , le PL de la machine et la PFH_d sont aussi calculés automatiquement.

Pour le contexte « labo. », les résultats obtenus avec *SISStema* se trouvent aux figures de l'annexe 14. Rappelons que, pour le contexte « labo. », les calculs entrepris avec le tableur *Excel* ont permis de conclure que le PL_r n'est pas satisfait et qu'il est impossible de statuer sur le $PL_{réel}$. De même, dans la première figure de l'annexe 14, à droite, le logiciel avertit que, pour le contexte « labo. », la FS étudiée ne répond pas aux exigences du PL_r . Contrairement à *Excel*, les figures de l'annexe 14 montrent que *SISStema* arrive à statuer sur le $PL_{réel}$ suivant : « c » qui diffère du $PL_r = e$. La deuxième figure de l'annexe 14 montre encore les résultats du contexte « labo. », mais avec un autre niveau de détails : la catégorie rencontrée ainsi que la valeur du $MTTF_d$ du canal 1 y sont présentées. Les paramètres du canal 2 ont disparu de la fenêtre du logiciel, car la catégorie approuvée par *SISStema* est la 1. La disparition automatique du canal 2 lors du choix d'une catégorie n'exigeant qu'un canal (catégories < 3) s'expliquerait par le fait que *SISStema* applique une norme de conception dans un objectif de conception et non d'estimation *a posteriori* d'un PL.

La figure de l'annexe 15 présente les résultats détaillés du contexte « usine » obtenus avec *SISStema*. Ces résultats sont similaires à ceux calculés sur *Excel* : $PL_{réel} = PL_r = e$. Remarquons, sur cette figure, la valeur exacte de la PFH_d : $4,16 \times 10^{-8}$. La catégorie rencontrée, les valeurs respectives du $MTTF_d$, de la DC_{avg} et de la CCF sont identiques à celles calculées sur *Excel*. Les avertissements signalés par le logiciel concernent les relais K01 et K02 : leurs $MTTF_d$ respectifs étant inférieur à 3 ans, c'est un signe qu'il faudra changer ces composants plus souvent que la normale, selon une période à déterminer.

Les calculs entrepris par *SISStema* permettent de conclure qu'il estime le PL selon le tableau K.1 (tableau informatif qui précise la figure normative numérotée 5 dans l'*ISO*

13849-1) et non le tableau 7 de la norme (tableau normatif). Cette remarque vient soulever une lacune de la norme : la présence de ces deux outils normatifs (tableau 7 et figure 5 de l'*ISO 13849-1*) laisse une marge de manœuvre aux concepteurs : ils peuvent utiliser le tableau 7, mais quand celui-ci devient difficile à appliquer à cause de son caractère restrictif, ils peuvent se rabattre sur la figure 5 dont les plages d'appartenance à un PL sont plus souples. Cette marge de manœuvre peut créer des inégalités dans les composants conçus. Par exemple, pour le contexte « usine », la FS étudiée dans ce mémoire satisfait le $PL_r = e$ en étant de catégorie 3, puisque le tableau K.1 de la norme (donc la figure 5 de la norme) a été utilisé. Cependant, si nous utilisons le tableau 7 de la norme, la FS ne satisfait pas le $PL_r = e$, car pour l'atteindre, il faut que l'architecture de la FS soit de catégorie 4. Cela permet de constater qu'un concepteur peut dire que son composant est de $PL = e$ alors qu'il est de catégorie 3 (s'il utilise la figure 5) et qu'un autre peut dire que son composant est de $PL = e$ alors qu'il est de catégorie 4 (s'il utilise le tableau 7).

Quoique *SISStema* soit un logiciel permettant de calculer le PL d'une FS, sur la base des données entrées par l'utilisateur dans son interface, une condition sine qua non à l'estimation du PL n'y est que partiellement prise en compte : l'estimation de la défaillance systématique. Nous le constatons après avoir fait l'exercice de validation sur *SISStema*. Or, la section 4.5.1 de l'*ISO 13849-1* inclut l'estimation de la défaillance systématique dans le processus de détermination du PL. La défaillance systématique se base sur différentes exigences, dont le respect des principes de base et des principes de sécurité éprouvés. Les principes de base représentent une condition nécessaire à la satisfaction de la catégorie B ; les principes de sécurité éprouvés constituent une condition nécessaire à la rencontre des catégories 1 à 4. Puisque pour calculer le PL, *SISStema* interroge l'utilisateur sur les critères de rencontre des catégories, nous pouvons dire qu'il ne tient compte que partiellement de la liste d'exigences permettant d'estimer la défaillance systématique. Il s'agit donc d'une lacune du logiciel.

En raison de cette lacune, il est important pour l'utilisateur de ce logiciel (ex. : le concepteur de la machine étudiée ou la personne qui valide une FS), de ne pas oublier de

vérifier lui-même la satisfaction des exigences de l'annexe G de l'*ISO 13849-1* à l'égard de l'estimation de la défaillance systématique. Dans le cadre d'une validation relative à la sécurité d'un système, l'IFA [41] met en garde ceux qui croient que cette validation se limite au calcul du PL réel. Pour compléter une telle validation il faut satisfaire les mesures contre les défaillances systématiques et s'assurer de l'aptitude d'une SRP/CS à s'exécuter dans un environnement prévu [41]. Si une de ces exigences applicables n'est pas rencontrée, il est impossible de statuer sur le PL réel de la machine et le PL calculé par *SISStema* sera erroné. Dans le cadre de l'étude, nous avons pu statuer sur le PL réel de la FS étudiée, car nous avons pris pour hypothèses que les défaillances systématiques avaient été évitées et que la FS était apte à s'exécuter dans des conditions environnementales prévues (cf. section 3.5). Pour les fins de l'étude, nous nous sommes permis de poser des hypothèses, mais en réalité, il faut que toute satisfaction d'exigences de la norme soit confirmée.

Au cours de l'utilisation du logiciel, les points suivants ont été retenus :

Avantages :

- *SISStema* est préférable à un tableur et aux calculs à la main, quand il faut calculer le PL d'une combinaison de sous-systèmes ;
- le logiciel donne la valeur exacte de la PFH_d de la FS, contrairement à l'*ISO 13849-1* qui fournit un intervalle pour ce paramètre ;
- avec un tableur, les calculs et logiques de traitement deviennent lourds à gérer et l'affichage des résultats est moins convivial que sur *SISStema*.

Limites : le $PL_{réel}$ estimé par *SISStema*

- tient partiellement compte de la défaillance systématique ;
- ne considère pas l'aptitude des SRP/CS à exécuter une FS dans des conditions environnementales prévues.

Tel que remarqué avec *Excel* et *SISStema*, les résultats obtenus pour chacun des contextes (« labo. » et « usine ») sont très différents : un écart de 79% existe entre les DC_{avg} des deux contextes. Comment s'expliquer un tel fossé, alors qu'il s'agit de la même

machine ? La section 3.5 vise à entreprendre des réflexions qui permettront d'éclairer cette constatation.

3.5 Hypothèses de la démarche

Dans un premier temps, listons au tableau 3.16 les hypothèses posées dans le cadre de l'étude, ainsi que leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ estimé ou sur la démarche de validation en général. Cela permettra, dans un premier temps, de comprendre grossièrement le comportement des paramètres $MTTF_d$ et DC_{avg} affectant l'estimation du $PL_{réel}$:

Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général

N°	Hypothèse	Justificatif	Impact sur la démarche ou sur le $PL_{réel}$
1	Le concepteur a utilisé la <i>NF EN ISO 13849-1 : 2008</i>	Pour valider une FS selon une norme donnée, il faut à la base que cette FS soit conçue selon la norme en question.	Selon la norme utilisée pour la validation, la démarche de validation peut changer, ainsi que les résultats.
2	Respect, par le concepteur, des exigences requises pour maîtriser, prévenir et éviter une défaillance systématique.	Sans la rencontre de ces exigences (cf. art.4.5.1 et annexe G de l' <i>ISO 13849-1</i>), il est impossible de statuer sur le $PL_{réel}$ de la machine. Nous supposons que le concepteur ait appliqué toutes ces exigences, ainsi nous pouvons estimer le $PL_{réel}$ de la presse.	Si cette exigence n'est pas rencontrée → impossibilité de statuer sur le PL .
3	La FS étudiée est apte à s'exécuter dans des conditions environnementales prévues.	Sans la rencontre de cette exigence (cf. art.4.5.1 de l' <i>ISO 13849-1</i>), il est impossible de statuer sur le $PL_{réel}$ de la machine. Nous supposons que le concepteur satisfasse cette exigence, ainsi nous pouvons estimer le $PL_{réel}$ de la presse.	Si cette exigence n'est pas rencontrée → impossibilité de statuer sur le PL .

Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général (suite)

N°	Hypothèse	Justificatif	Impact sur la démarche ou sur le $PL_{réel}$
4	Le relais K03 ne participe pas à la partie fonctionnelle de la FS étudiée, mais contribue au diagnostic des interrupteurs et autres relais du canal 1.	L'analyse du schéma électromécanique en présence de défauts permet de déduire que K03 effectue le diagnostic du canal 1 de la FS.	<p>Si K03 fait le diagnostic du canal 1, il procure une DC élevé (99 %) aux composants : S151A, K01 et K02 (rappel : S151B a l'exclusion de défauts). La DC = 99 %, car K03 est un élément électromécanique à contacts guidés surveillant directement des composants électromécaniques (cf. tableau E.1 de l'<i>ISO 13849-1</i>).</p> <p>Sinon, K03 fait partie de la commande de la FS, ce qui fait chuter la DC de chaque composant. Ainsi, en gardant des $MTTF_d$ par composant fixe, DC_{avg} diminue, ce qui fera croître la PFH_d et conséquemment, risque de diminuer le $PL_{réel}$.</p>

Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général (suite)

N°	Hypothèse	Justificatif	Impact sur la démarche ou sur le $PL_{réel}$
5	La carte électronique programmable communiquant avec le canal 1 et celle communiquant avec le canal 2 sont ignorées dans les calculs du DC_{avg} .	<p>Ne retraçant pas la manière dont la carte électronique programmable traite les signaux du canal 2, notamment ceux de la commande Y171, le pire cas est considéré : $DC = 0$.</p> <p>Le problème se pose moins avec le canal 1 : les interrupteurs communiquant avec la carte électronique programmable sont diagnostiqués par K03 dont l'apport en $DC = 99\%$. D'après le tableau E.1 de l'<i>ISO 13849-1</i>, la plus grande DC qui y figure vaut 99%. Alors, l'apport en diagnostic par cette carte ne change rien à la valeur de la DC : entre deux DC de valeurs différentes, nous prenons la plus grande, donc 99% certainement.</p>	Si le traitement des signaux effectué dans ces cartes avait pu être retracé, nous aurions pu les analyser afin de savoir si du diagnostic était effectivement entrepris et si oui, comment. Cette analyse permettrait probablement d'attribuer une valeur autre que 0 à la DC apportée par chaque carte. Ainsi, en gardant fixes des $MTTF_d$ par composant, la présence de cette DC augmente la DC_{avg} . Ceci fait chuter la PFH_d et conséquemment, risque d'augmenter le $PL_{réel}$.
6	$(MTTF_d)_{Y101} = (MTTF_d)_{Y171} = 150$ années*, car la satisfaction à toutes les exigences de l'article C.3 de la <i>NF EN ISO 13849-1:2008</i> ont été supposément rencontrées par le concepteur.	Ne trouvant pas de fiche technique des distributeurs « D1 » et « D2 » indiquant leur $MTTF_d$ ou des paramètres permettant de le calculer, nous avons pris le $MTTF_d$ mentionné au tableau C.1 de l' <i>ISO 13849-1</i> .	<p>Le $MTTF_d$ réel de chaque distributeur est inconnu. Si sa valeur est supérieure à 150, la DC_{avg} augmentera. Ceci ferait chuter la PFH_d et conséquemment, risque d'augmenter le $PL_{réel}$.</p> <p>Si elle est inférieure à 150, la DC_{avg} diminue. Ceci fait croître la PFH_d et conséquemment, risque de réduire le $PL_{réel}$.</p>

Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général (suite)

N°	Hypothèse	Justificatif	Impact sur la démarche ou sur le $PL_{réel}$
7	$B_{10d} = 400\,000$ cycles pour tous les relais de la FS étudiée, car la satisfaction à toutes les exigences de l'article C.3 de l' <i>ISO 13849-1</i> sont supposément rencontrées par le concepteur.	Ne trouvant pas de fiche technique des relais indiquant leur $MTTF_d$ ou des paramètres permettant de le calculer, nous prenons le B_{10d} mentionné au tableau C.1 de l' <i>ISO 13849-1</i> . Le pire des cas est choisi : relais avec une charge maximale ($B_{10d} = 400\,000$) plutôt qu'un relais avec une faible charge ($B_{10d} = 20\,000\,000$).	Le B_{10d} est directement proportionnel au $MTTF_d$. Alors, le DC_{avg} , la PFH_d et le $PL_{réel}$ se comporteront selon la variation du $MTTF_d$, tel qu'expliqué plus tôt.
8	$B_{10d} = 2\,000\,000$ cycles pour tous les interrupteurs de la FS étudiée, car la satisfaction à toutes les exigences de l'article C.3 de l' <i>ISO 13849-1</i> sont supposément rencontrées par le concepteur.	Ne trouvant pas de fiche technique des interrupteurs indiquant leur $MTTF_d$ ou des paramètres permettant de le calculer, nous prenons le B_{10d} mentionné au tableau C.1 de l' <i>ISO 13849-1</i> . Il s'agit d'un interrupteur pour protecteur verrouillé indépendant de la charge.	Idem
9	Les paramètres permettant de calculer le $MTTF_d$ dans le « contexte labo. ».	Ces paramètres sont fixés selon la fréquence d'utilisation de la presse en l'an 2010.	Dans le contexte « labo. » : exigences non satisfaites du $PL_r = e$ ($PL_{réel} = c$). Dans le contexte

Tableau 3.16 : Liste des hypothèses posées pour l'étude, leur justificatif et leur impact sur le $PL_{réel}$ ou la démarche de validation en général (suite)

N°	Hypothèse	Justificatif	Impact sur la démarche ou sur le $PL_{réel}$
10	Les paramètres permettant de calculer le $MTTF_d$ dans le « contexte usine ».	Ces paramètres sont fixés selon la fréquence moyenne d'utilisation de la presse, selon le fonctionnement d'une usine québécoise travaillant le jour comme la nuit, tout en se gardant un nombre d'heures d'arrêt de la presse pour changer le moule ou pour de l'entretien.	« usine » : exigences satisfaites du $PL_r = e$, ($PL_{réel} = e$). → Pourquoi cette différence ?

***Remarque :** Une fiche technique [84] du fabricant de ces distributeurs a été trouvée. Cependant, elle présente des valeurs de $MTTF_d$ pour une série de distributeurs de modèles différents de ceux utilisés pour la FS étudiée. Il a été constaté que, dans cette fiche technique, les valeurs par défaut inscrites au tableau C.1 de la norme ont été attribuées aux $MTTF_d$ des distributeurs listés par le fabricant. Cette constatation amène une interrogation : le $PL_{réel}$, estimé à partir de $MTTF_d$ provenant de fiches techniques, représente-t-il vraiment la réalité de la FS de la machine étudiée ? Cela signifierait-il que l'estimation du $MTTF_d$ réel d'un composant est difficile à entreprendre ?

3.5.1 Impact de certaines hypothèses sur le $PL_{réel}$

Les impacts susmentionnés des hypothèses de l'étude sont qualitatifs. Ils expliquent peu le fossé entre les résultats des deux contextes d'étude. Cependant, il sera intéressant de comprendre le comportement des paramètres calculables ($MTTF_d$ et DC_{avg}) selon le contexte d'utilisation de la machine et de ce fait, leur impact quantitatif (donc précis) sur le PL de la machine. En observant la formule de calcul du $MTTF_d$ et celle de la DC_{avg} , nous constatons qu'il s'agit d'équations rationnelles. Alors, si nous calculons ces deux paramètres pour une série de contextes d'utilisation différents de la presse, la valeur de

chacun de ces paramètres évoluera, mais à un moment donné, elle tendra vers une asymptote (c'est le propre d'une fonction rationnelle).

Sans plus tarder, observons comment se comportent les $MTTF_d$ et DC_{avg} entre nos deux contextes extrêmes : « labo. » et « usine » :

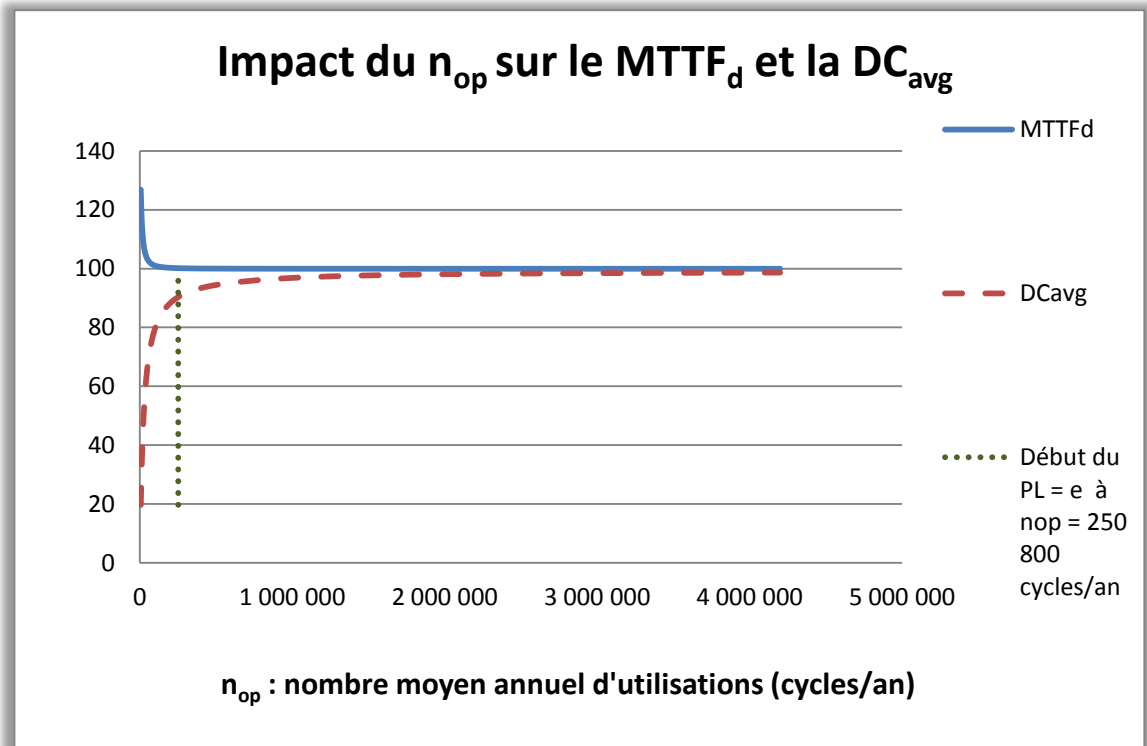


Figure 3.6 : Comportement du $MTTF_d$ et de la DC_{avg} selon le contexte d'utilisation

Le graphique de la figure 3.6 montre qu'à partir de 250 800 c/a, la FS satisfait les exigences du $PL_r = e$. Les 250 800 c/a correspondent à une utilisation moyenne de la presse de : 19 h/d, 22 d/a et $t_{cycle} = 6$ s. Cependant, dans la zone graphique où le nombre moyen annuel d'utilisations est inférieur à 250 800 c/a, la FS ne satisfait pas encore les exigences du $PL_r = e$. D'une part, le graphique montre que plus la machine est utilisée, plus le $MTTF_d$ diminue, mais de manière asymptotique. Ceci correspond bien à notre logique intuitive : plus on utilise la machine, plus elle s'use, donc plus des défaillances dangereuses risquent de se manifester tôt, donc la durée avant que survienne la défaillance dangereuse se trouve réduite. D'autre part, le graphique illustre que plus la

machine est utilisée, plus la couverture du diagnostic moyenne croît de manière à tendre vers une asymptote. En effet, plus on utilise la machine, plus les moyens de diagnostic de défaut mis en place par le concepteur sont mis à l'épreuve, afin d'effectuer la surveillance des composants concernés dans le circuit. Par ailleurs, moins on utilise la machine, moins ces moyens de diagnostic de défaut sont sollicités. Toutefois, une question demeure : « Pourquoi ce fossé de 79 % entre les DC_{avg} des deux contextes ? ». Nous avons cherché des éléments de réponse à cette question en lisant des comptes-rendus [85, 86] de réunions du comité technique n° 44 du CEI collaborant à la fusion des normes *NF EN 62061:2005* et *NF EN ISO 13849-1:2008*. Dans le compte-rendu du 22 avril 2011 [86], la mention indiquant que la norme *NF EN 62061:2005* ne s'applique pas aux fonctions de sécurité peu sollicitées a incité à chercher s'il en était de même pour la *NF EN ISO 13849-1:2008*. Dans cette optique, nous avons contacté un des auteurs de la norme ISO ; il s'agit d'un consultant en sécurité de conception. Il a confirmé que la *NF EN ISO 13849-1:2008* prend ses fondements dans le volet de la norme *CEI 61508-1* [101] qui traite des FS fortement sollicitées. Malheureusement, selon lui, la frontière entre « fortement sollicitée » et « faiblement sollicitée » n'est pas définie. Compte tenu de ces informations, nous pouvons interpréter ainsi le graphique obtenu :

- la plage entre le contexte « labo. » et la ligne verticale montrant le début d'atteinte du $PL_r = e$ correspond à la zone « faibles sollicitations » propre à la FS étudiée et les hypothèses d'étude établies puisque pour cette zone, il est impossible de statuer sur le PL. Dans ce cas, nous ne devons pas utiliser la *NF EN ISO 13849-1:2008*, mais le volet « faibles sollicitations » de la *CEI 61508-1*. Ainsi, l'inapplicabilité de la norme ISO à des FS faiblement sollicitées explique le monde de différence entre les deux contextes d'étude ;
- la plage entre la ligne verticale montrant le début d'atteinte du $PL_r = e$ et le contexte « usine » correspond à la zone « fortes sollicitations » propre à la FS étudiée et les hypothèses d'étude établies, étant donné que pour cette zone, la FS a un PL constant pour toutes les sollicitations : $PL = PL_r$. Pour cette zone, la *NF EN ISO 13849-1:2008* est donc applicable.

Le graphique de la figure 3.7 illustre ces deux zones, ainsi que la frontière qui les sépare. Cette frontière, représentée par la droite signalant l'atteinte du PL_r , est propre à la FS étudiée et les hypothèses d'étude établies.

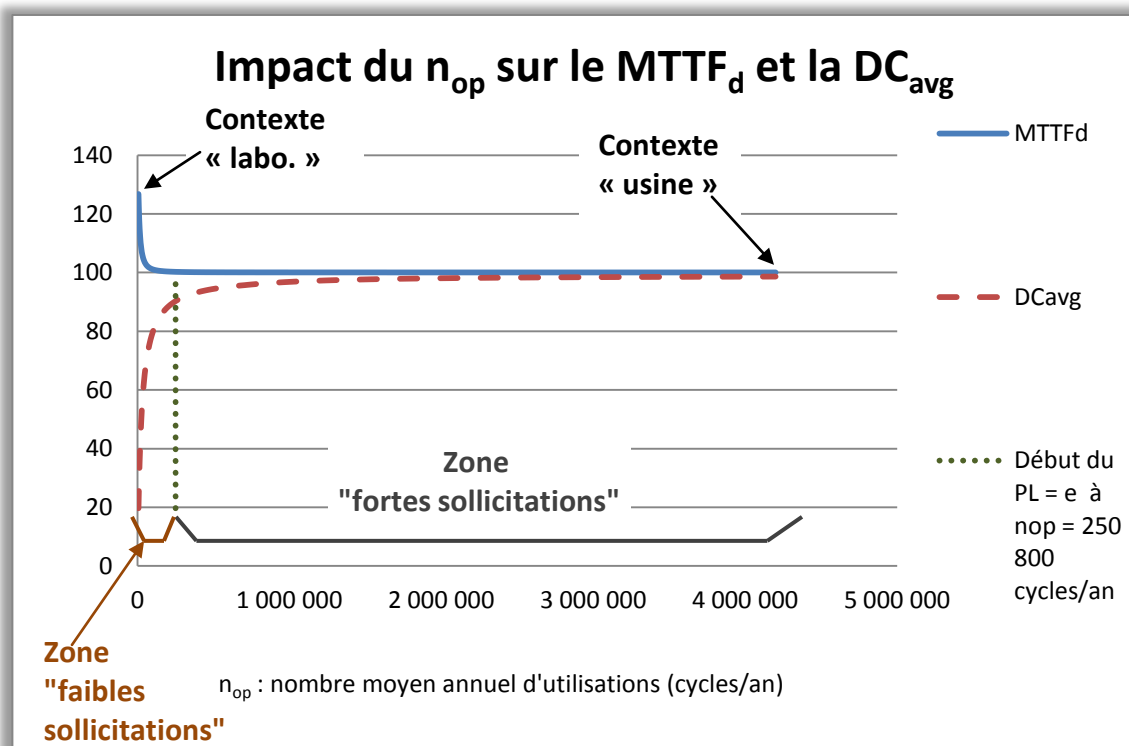


Figure 3.7 : Zones des faibles et fortes sollicitations de la presse

Pourquoi préciser : « et les hypothèses d'étude établies » ? C'est parce que le graphique suivant (cf. figure 3.8) montre que si en réalité la DC du canal 2 est non nulle (donc changement d'hypothèse), la ligne verticale indiquant l'atteinte du PL_r (la frontière) se déplace. Alors, le spectre des zones « fortes sollicitations » et « faibles sollicitations » change. En d'autres termes, pour une validation *a posteriori* d'une FS, la frontière entre « fortes sollicitations » et « faibles sollicitations » dépend des hypothèses d'étude et de la personne entreprenant la validation.

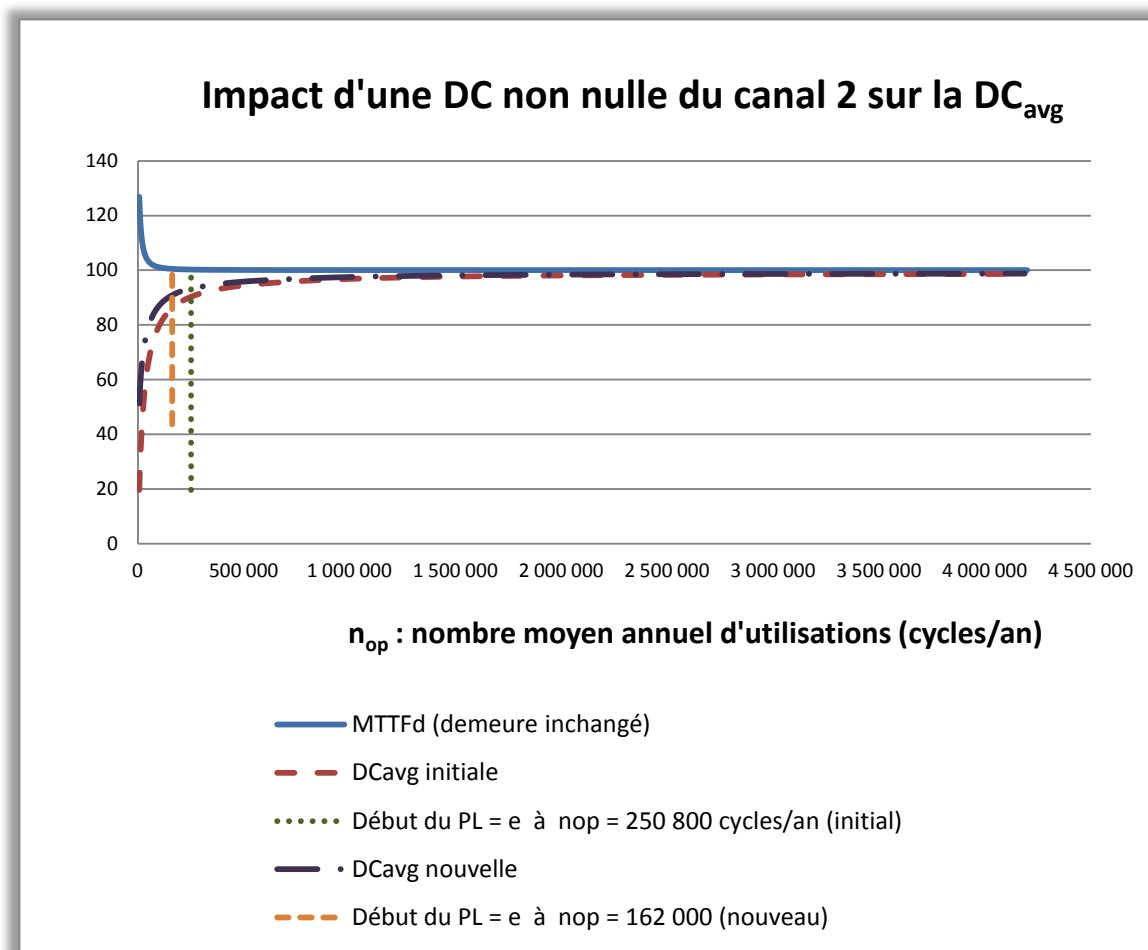


Figure 3.8 : Impact d'une DC non nulle au niveau du canal 2

Pour la nouvelle courbe de la DC_{avg} , une valeur de 60% a été attribuée à la DC du distributeur « D2 ». Cette hausse de la DC de la commande du distributeur « D2 » a pour effet de translater la courbe de la DC_{avg} vers la gauche (cf. figure 3.8) et de permettre d'obtenir un $PL_{réel} = e$ pour une utilisation moindre que précédemment : 162 000 c/a contre les 250 800 c/a trouvés antérieurement. Somme toute, augmenter la DC des composants participant à une FS augmente l'étendue de la zone « fortes sollicitations », tout en réduisant la zone « faibles sollicitations ». Il est normal de n'observer aucun impact sur la courbe du $MTTF_d$ puisque d'après sa formule de calcul, ce paramètre est indépendant de la DC.

3.6 Récapitulatif de l'étude d'estimation *a posteriori* d'un PL

3.6.1 Impact de la personne qui valide

Dans le cadre de l'étude, il a fallu valider une FS dont nous ignorions la démarche et la logique de conception. Alors, nous avons la situation suivante : nous ignorions si le fabricant avait suivi ou non des normes pour concevoir la presse et plus précisément la FS étudiée, mais nous devions valider cette fonction avec une norme précise : la *NF EN ISO 13849-1:2008*. C'est une norme de conception avant tout et elle n'est peut-être pas celle qu'a appliquée le concepteur. Il a donc fallu, dans le cadre de la validation architecturale de la FS, utiliser des principes propres à la norme qui n'ont pas nécessairement été appliqués par le concepteur. Par exemple, pour valider cette FS selon l'*ISO 13849-1*, il a fallu déterminer l'architecture désignée qu'a adoptée le concepteur ; ce qui est absurde dans le cas où le concepteur n'a pas utilisé cette norme. Nous avons donc pris pour hypothèse que le concepteur a voulu suivre l'*ISO 13849-1* pour construire la presse.

Selon la personne qui valide, nous obtiendrons des résultats différents, car :

- ▶ nous nous mettrons à la place du concepteur, en essayant d'imaginer ce qu'il a pensé faire lors de la conception du circuit (*reverse engineering*) ;
- ▶ si différentes personnes tentent d'appliquer cet exercice de validation, chacune de leur côté, il ne sera pas étonnant d'arriver à des interprétations différentes sur le plan architectural, au niveau des paramètres permettant de statuer sur le $PL_{réel}$.

Conseil :

Pour améliorer la justesse des résultats, il faut minimiser le nombre d'hypothèses. La meilleure façon d'y arriver est d'effectuer un tel exercice avec l'encadrement du concepteur ou du fabricant de la machine. Cela permet d'optimiser les résultats d'une telle démarche de validation.

Dans notre cas, le résultat n'est pas absolu ! En effet, la personne qui valide la FS le fait selon son interprétation du schéma analysé et sans l'encadrement du concepteur : toute l'analyse des circuits pour en arriver aux calculs n'a été possible que par du *reverse engineering*. Ainsi, lors d'une validation sans l'accompagnement du concepteur, les résultats sont relatifs : ils dépendent du contexte choisi pour l'étude et des hypothèses découlant de la compréhension de celui qui valide.

3.6.2 La notion de PL est relative

La deuxième conclusion de l'étude est que :

- ▶ le PL d'une FS estimé *a posteriori* dépend des hypothèses d'étude, comme en témoignent les graphiques des figures 3.7 et 3.8 ;
- ▶ la possibilité d'utiliser deux outils tirés d'une même norme montre que la valeur d'un PL peut être subjective selon que le concepteur décide de suivre la figure 5 (outil souple) ou le tableau 7 (outil plus restrictif) de l'*ISO 13849-1*. C'est une variabilité au niveau de la conception qui devrait être mise en lumière dans le cadre de la fusion des normes *CEI 62061* et *ISO 13849-1*.

3.6.3 Démarche suggérée pour la validation architecturale d'une fonction de sécurité de machine

Finalement, de cette étude, nous pouvons suggérer la démarche suivante de validation architecturale (estimation *a posteriori* d'un PL) d'une FS d'une machine industrielle selon la norme *NF EN ISO 13849-1:2008* :

- 0) idéalement, faire l'exercice avec le concepteur ou le fabricant de la machine. Autrement, faire du *reverse engineering* et poser des hypothèses lorsqu'on ignore la logique du concepteur ;
- 1) connaître le fonctionnement de la machine ;
- 2) choisir la FS à valider et identifier les sources d'énergie impliquées dans la FS ;

- 3) identifier et spécifier cette FS ;
- 4) connaître le PL_r de cette FS (le PL_r peut être disponible dans une norme de type C ou doit être estimé selon l'annexe A de la *NF EN ISO 13849-1:2008*) ;
- 5) noter les critères pour rencontrer ce PL_r (ce sera utile pour le point 16). Ces critères doivent être choisis selon le tableau 7 ou le tableau K.1 de la norme ;
- 6) cibler les parties de la machine contribuant à la fonction standard contre laquelle la FS doit protéger l'utilisateur (ex. : le travailleur) ;
- 7) établir les équations logiques conditionnant les ordres donnés à la partie opérative (PO) concernant cette fonction standard ;
- 8) identifier le circuit à l'origine de chaque ordre donné à cette PO ;
- 9) analyser ce circuit en absence de défaut, puis en présence de défauts ;
- 10) distinguer les composants du circuit responsables de la partie fonctionnelle de la FS, de ceux responsables de sa partie diagnostic ;
- 11) identifier et dessiner les canaux contribuant à la FS ;
- 12) vérifier si l'architecture dessinée correspond à une architecture désignée de la *NF EN ISO 13849-1:2008* ;
- 13) associer à chaque composant de l'architecture ses caractéristiques pertinentes à la vérification des critères d'une catégorie (B, 1, 2, 3 ou 4) ;
- 14) effectuer les calculs requis (ex : $MTTF_d$, DC_{avg}) ;
- 15) conclure sur l'appartenance ou non à une catégorie donnée ;
- 16) si appartenance à une catégorie, vérifier les mesures contre la défaillance systématique et l'aptitude à exécuter la FS dans des conditions environnementales prévues ;
- 17) si le point précédent est satisfait, estimer le $PL_{réel}$ à l'aide de l'outil normatif choisi au début (tableau 7 ou tableau K.1 de la *NF EN ISO 13849-1:2008*) ;

18) statuer sur la conformité du $PL_{réel}$ au PL_r (c.-à-d., vérifier si : $PL_{réel} \geq PL_r$ [2, 51, 76]).

Remarque : cet exercice de validation architecturale a été entrepris sur une FS simple (la validation par essais et analyse n'a pas été abordée dans ce document). En réalisant l'ampleur d'une telle étude pour une FS simple, imaginons combien cet exercice serait fastidieux pour une FS plus complexe, voire pour toutes les FS d'un système de commande ! La difficulté principale de l'étude est due au manque de certaines données que nous ignorons du concepteur ou du fabricant. À l'avenir, il sera intéressant de comprendre la manière dont sont traitées les données échangées au niveau des cartes électroniques programmables reliées respectivement aux commandes Y171, Y501. Cette compréhension permettra de chiffrer la DC rattachée à ces commandes et de comprendre la manière dont la carte peut perturber la commande Y501.

CONCLUSION

Tout compte fait, ce mémoire qui s'adresse notamment aux employeurs, aux travailleurs, aux intégrateurs et concepteurs de systèmes de commande relatifs à la sécurité les a conscientisés par rapport aux risques liés aux interventions de production et de maintenance dans la zone du moule des presses à injection de plastique horizontales ayant des équipements périphériques, ainsi que les moyens de réduction du risque. Les risques émanant des situations de travail observées lors de quatre visites en usines et les moyens de les réduire ont été recensés et évalués (commentés). Un point commun entre les quatre usines visitées est l'utilisation de FS plutôt que du cadenassage (au sens du RSST) pour les interventions dans la zone du moule autres que la réparation (maintenance corrective). Même si, le RSST n'exige pas le cadenassage pour les opérations autres que la maintenance, la réparation et le déblocage, les usines visitées ont étudié s'il était possible de cadenasser la presse lors du changement de moule par exemple, vu le risque considérable encouru. Malheureusement, le besoin de mettre en mouvement certains éléments mobiles dans la zone du moule font qu'ils en sont arrivés à n'utiliser que les FS pour cette opération, sauf une des usines qui a quand même pris la peine d'appliquer le cadenassage partiel présenté plus tôt. Cela témoigne que la sécurité des travailleurs lors des opérations observées repose essentiellement sur la fiabilité des FS.

Lors des visites en usines, nous avons remarqué le manque de connaissance de certains intégrateurs et concepteurs à l'égard des principes de sécurité éprouvés, de la notion des catégories, ainsi que leurs difficultés à statuer sur la fiabilité du circuit d'une FS. Nous avons également constaté que selon les participants rencontrés, la notion de niveau de performance d'une FS (notion permettant d'estimer la fiabilité d'une FS et de vérifier l'atteinte du niveau de réduction du risque requis) est soit peu connue, soit ignorée. Ainsi, cette notion n'est malheureusement pas considérée lors de l'intégration des équipements périphériques pour s'assurer de la fiabilité des FS nouvellement incorporées au système « presse-périphérique(s) ». Compte tenu de ces constatations,

une démarche de validation *a posteriori* d'une FS a été présentée afin de les sensibiliser à l'importance de concevoir une FS fournissant le niveau de réduction du risque requis. Cette démarche a également permis de comprendre les difficultés de l'exercice (les hypothèses en témoignent), en l'absence du concepteur. La complexité d'application d'une norme de conception (ici, NF EN ISO 13849-1:2008) à de la validation *a posteriori* en est un exemple. Il serait donc souhaitable d'avoir une norme de validation *a posteriori* d'une FS. Pour les normes de conception existantes et les éventuelles normes de validation, l'idéal serait qu'elles soient conviviales et faciles d'application pour des systèmes simples. Quant aux systèmes complexes, disposer de normes de conception et de validation complexes semble logique et acceptable. Dans le cadre de la fusion actuelle des normes CEI 62061 et ISO 13849-1, il serait avantageux de considérer ces dernières recommandations.

L'ampleur des risques observés dans le cadre de l'étude et les possibilités de les réduire peuvent amener à la question : « Par où commencer ? ». D'abord, une matrice de risque correspondant à la réalité de votre usine devra être définie par concertation [88, 89] entre travailleurs et employeurs, selon vos critères d'acceptabilité du risque (Chinniah et al. proposent des règles de construction d'un outil d'estimation du risque [90]). Cette concertation sert à dissoudre la réticence aux changements et optimiser le succès de l'application des moyens de réduction du risque. La matrice de risque, après une analyse du risque, permettra de l'apprécier afin de prendre une décision sur les risques à réduire et dans quel ordre. Plusieurs outils d'analyse du risque sont à votre disposition (ex. : arbre des fautes, AMDEC [88]). Le mieux est d'inclure un ergonome dans ce processus itératif de gestion du risque, afin de réaliser une analyse complète de l'activité et d'assurer un suivi dans l'implantation des solutions. L'avantage de l'analyse ergonomique de l'activité est la prise en compte des variabilités de l'activité de travail afin de mieux comprendre les stratégies et façons de faire développées et apporter des solutions adaptées aux travailleurs.

Aux concepteurs : la présence d'un ergonome est d'or au moment de la conception de la presse... et de tout équipement d'ailleurs ! En effet, l'ergonome éclaire le concepteur de

l'équipement afin que la configuration de celui-ci soit favorable au travailleur (ex. : lui éviter des postures contraignantes, minimiser ses déplacements). Grâce à l'intervention ergonomique, l'utilisation future des équipements est prise en compte dès la conception et ce, pour toutes les phases de vie de l'équipement (ex. : installation, production, maintenance, démantèlement) [68]. En effet, il est plus facile et plus sécuritaire d'apporter des modifications à un équipement ou un poste de travail à l'étape de conception plutôt qu'après !

Somme toute, l'employeur dont la machine menace la sécurité de ses travailleurs doit faire le nécessaire pour sauvegarder la sécurité de ces derniers. À leur tour, les travailleurs se doivent de respecter les moyens de réduction du risque convenus avec leur employeur. Après tout, « la prévention, c'est l'affaire de tous : travailleurs et employeurs » [91].

RÉFÉRENCES

- [1] Association Française de Normalisation, "Sécurité des machines – Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité," *Association Française de Normalisation*, NF EN 62061, 2005.
- [2] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité — Partie 1 : Principes généraux de conception," *Comité européen de normalisation*, NF EN ISO 13849-1, 2008.
- [3] Baudoin, J. et Bello, J.P., "Guide pratique d'application de la norme NF EN 62061, " Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Vandœuvre-lès-Nancy, Lorraine, France, Rapport technique IET/10RT-257/JBn/JBo, 2010.
- [4] Publications du Québec, "Loi sur la santé et la sécurité du travail," *Publications du Québec*. [En ligne]. Disponible : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_2_1/S2_1.html. [Consulté le 13 septembre 2011].
- [5] Marinatchi, L. et Arsenault, J., *Gréage et appareils de lavage*, Longueuil : Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la fabrication de produits en métal, de la fabrication de produits électriques et des industries de l'habillement (ASPHME), 2010.
- [6] Chinniah, Y. et Champoux, M., "La sécurité des machines automatisées - Analyse des risques et des moyens de protection sur une presse à injection de plastique," Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Rapport de recherche R-557, 2008.

- [7] Beauchamp, Y., Dung Ngô, A., Yengue, G. et Trudel, C., "Les problèmes de sécurité associés à l'utilisation des presses à injecter les plastiques," in Actes du 15 Congrès de l'Association pour l'Hygiène Industrielle au Québec, 1993, pp. 26-33.

- [8] Ningbo Guande Machinery Co., Ltd., " Plastic Injection Molding Machine," *Ningbo Guande Machinery Co., Ltd.*, 2010. [En ligne]. Disponible : <http://www.injection-machinery.com/news/Plastic-Injection-Molding-Machine-16.html>. [Consulté le 29 juillet 2011].

- [9] Tessier, S., Mongeau, P., Trottier, J. et Grondin, N., "Diagnostic sectoriel de l'industrie des plastiques et des composites," PlastiCompétences inc. - Comité sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie des plastiques et des composites, Québec, Canada, Rapport, 2009. [En ligne]. Disponible : <http://www.plasticcompetences.ca/uploads/pdf/Diagnostic2009-LR.pdf>. [Consulté le 4 août 2010].

- [10] Ministère du développement économique, de l'innovation et de l'exportation du Québec, "Plasturgie – Présentation de l'industrie," Ministère du développement économique, de l'innovation et de l'exportation du Québec. [En ligne]. Disponible : http://www.mdeie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/plasturgie/page/le-secteur-10856/?tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=155&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D=&cHash=0aec2e982dabba32107c7680cdb9095. [Consulté le 29 juillet 2011].

- [11] Industrie Canada, "Machines et moules à plasturgie," Industrie Canada. [En ligne]. Disponible : <http://www.ic.gc.ca/eic/site/plastics-plastiques.nsf/fra/pl01409.html>. [Consulté le 10 août 2010].

- [12] Jocelyn, S., Massé, S. et Sirard, C., "Presse à injection de plastique horizontale – Grilles de vérification de la sécurité," Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Guide RG-670, 2011.
- [13] Munch, T., " Presses à injecter - Fonctions et solutions constructives," in *Matériaux*, vol. AM 3 671, Paris : Techniques de l'ingénieur, 2009, pp. 1-16. [Livre électronique]. Disponible : Techniques de l'ingénieur.
- [14] Sonet, J. et Sanlias, G., *Sécurité dans la transformation des matières plastiques – Tome I Conseils aux opérateurs et aux régleurs*, Paris : INRS, 1974.
- [15] EPICEA, "EPICEA Affichage d'un dossier", EPICEA. [En ligne]. Disponible : http://epicea.inrs.fr/servlet/public_display. [Consulté le 22 avril 2010].
- [16] Dobraczynski, A. et Chatain, M., " Injection des thermoplastiques : les moules," in *Matériaux*, vol. A3680, Paris : Techniques de l'ingénieur, 1995, pp. 1-64. [Livre électronique]. Disponible : Techniques de l'ingénieur.
- [17] Health and Safety Executive (HSE), *Safety at injection moulding machines – Plastics Processins Sheet No 4*, édition : juin 1999, Sudbury : HSE, 1999.
- [18] Paques, J.J. et al, "Sécurité des machines : phénomènes dangereux, situations dangereuses, événements dangereux, dommage," Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST) et Institut de recherche Robert-Sauvé, Montréal, Québec, Canada, Pochette DC 900-337-1PDF (06-11), 2004.
- [19] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Principes généraux de conception — Appréciation du risque et réduction du risque," Organisation internationale de normalisation, ISO 12100, 2010.

- [20] Robert, B., "Analyse et gestion des risques technologiques IND6126," École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada, Note de cours Automne 2010, 2010.
- [21] Desjardins-David, I. et Arteau, J., "Méthodologie d'analyse des solutions SST pour convaincre les différents intervenants," *Revue Internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels*, vol. 2, no. 1, pp. 1-14, 2009.
- [22] Ministère du Travail de l'Ontario, "Information Alerte – Accident mortel – presse à injection," Ministère du Travail de l'Ontario, Ontario, Canada, Info Alerte n° 32, 1993.
- [23] Lambert, N. et Marchand, D., "Accident mortel survenu à un travailleur le 8 mai 2003, à l'usine « Les produits multifoam international » de St-Nicéphore," Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), Québec, Canada, Rapport d'enquête d'accident RAP0184332, 2003. [En ligne]. Disponible : <http://centredoc.csst.qc.ca/pdf/ed003404.pdf>. [Consulté le 15 mars 2010].
- [24] Legendre, C. et Lachance, R., "Accident mortel survenu à un travailleur le 12 juillet 2006 à l'entreprise Les Systèmes de Drainage Modernes inc. 1288, Montée Léger à Les Cèdres," Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), Québec, Canada, Rapport d'enquête d'accident RAP0425084, 2007. [En ligne]. Disponible : <http://centredoc.csst.qc.ca/pdf/ed003655.pdf>. [Consulté le 15 mars 2010].
- [25] Association Française de Normalisation, "Machines pour les matières plastiques et le caoutchouc – Machines de moulage par injection – Prescription de sécurité," Association Française de Normalisation, NF EN 201, 2009.

- [26] Publications du Québec, "Règlement sur la santé et la sécurité du travail," Publications du Québec. [En ligne]. Disponible : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FS_2_1%2FS2_1R19_01.htm. [Consulté le 2 juillet 2010].
- [27] Tolinski, M., "Safety-Versed for "Safety first"," *Plastics Engineering*, vol. 60, no. 12, pp. 26-27, 2004.
- [28] Giraud, L., Massé, S., Dubé, J., Schreiber, L. et Turcot, A., "Sécurité des convoyeurs à courroie – Guide de l'utilisateur," Montréal, Québec. Canada, Guide technique DC 200-16227-1 (04-01), 2003.
- [29] Plante, J.G., "Accident grave survenu à une travailleuse le 5 janvier 1995, vers 0h15 à l'usine Plastiques Gagnon Estrie Inc. au 2095, rue Dandenault à Laurenceville," Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), Québec, Canada, Rapport d'intervention I168137, 1995. [En ligne]. Disponible : <http://centredoc.csst.qc.ca/pdf/ed002898.pdf>. [Consulté le 15 mars 2010].
- [30] Douville, S., Plante, J.G. et Charland, R., "Accident grave survenu à un travailleur le 2 juin 2006 à l'entreprise Industries PPD Inc. 1649, rue Belvédère Sud à Sherbrooke," Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), Québec, Canada, Rapport d'enquête d'accident RAP0481892, 2007. [En ligne]. Disponible : <http://www.centredoc.csst.qc.ca/pdf/ed003667.pdf>. [Consulté le 15 mars 2010].
- [31] Plante, C. et Poulin, S., *Guide d'enquête et d'analyse des accidents*, 2^{ème} édition, Montréal : Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail secteur « Affaires municipales » (APSAM), 1998.

- [32] de Champlain, F., "Organisation de la santé et de la sécurité du travail en entreprise IND8833," École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada, Note de cours Automne 2009, 2009.
- [33] Pérusse, M., *Le coffre à outils de la prévention des accidents en milieu de travail*, Napierville : Groupe de communication Sansectra, 1995.
- [34] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Appréciation du risque — Partie 2 : Lignes directrices pratiques et exemples de méthodes," Organisation internationale de normalisation, ISO 14121-2, 2007.
- [35] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Notions fondamentales, principes généraux de conception — Partie 1 : Terminologie de base, méthodologie," Organisation internationale de normalisation, ISO 12100-1, 2003.
- [36] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Notions fondamentales, principes généraux de conception — Partie 2 : Principes techniques," Organisation internationale de normalisation, ISO 12100-2, 2003.
- [37] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Appréciation du risque – Partie 1 : Principes," Organisation internationale de normalisation, ISO 14121-1, 2007.
- [38] American National Standards Institute, "Criteria for safety symbols," American National Standards Institute, ANSI Z535.3, 2007.
- [39] American National Standards Institute, "American National Standard for Plastics Machinery – Horizontal Injection Molding Machines – Safety Requirements for Manufacture, Care, and Use," American National Standards Institute, ANSI/SPI B151.1, 2007.

- [40] Suvapro, *Liste de contrôle – Machines à injecter (îlots de production)*, édition : mars 2010 (référence : 67130.f), Lausanne : Suva, protection de la santé, division sécurité au travail, 2010.
- [41] Bömer, T. et Schaefer, M., "Differences between using standard components or safety components to implement safety functions of machinery," *Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)*, 2011. [En ligne]. Disponible : http://www.dguv.de/ifa/en/pra/en13849/standard_components.pdf. [Consulté le 2 août 2011].
- [42] Safety automation, "APS (Automate Programmable de Sécurité) ou APIdS (Automate Programmable dédié à la Sécurité)," *Safety automation*, 2010. [En ligne]. Disponible : <http://safety-automation.agence-presse.net/2010/04/16/automate-programmable-de-securite/>. [Consulté le 25 novembre 2011].
- [43] Dei-Svaldi, D. et Kneppert, M., "Gestion des fonctions de sécurité par automate programmable dédié à la sécurité (APIdS)," Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Vandœuvre-lès-Nancy, Lorraine, France, Les notes scientifiques et techniques de l'i.n.r.s NS 0224, 2002.
- [44] Paques, J.J., "Règles sommaires de sécurité pour l'utilisation des automates programmables industriels (API)," Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Rapport de recherche B-028, 1991.
- [45] Association canadienne de normalisation, "Maîtrise des énergies dangereuses : cadenassage et autres méthodes," *Association canadienne de normalisation, CSA Z460*, 2006.

- [46] Burlet-Vienney, D., Jocelyn, S., Chinniah, Y., Daigle, R. et Massé, S., "Vérification du contenu d'un programme de cadenassage," Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Guide RF-617, 2009.
- [47] American National Standards Institute, "American National Standard for Plastics Machinery – Horizontal and Vertical Injection Molding Machines – Safety Requirements for the Integration, Care, and Use," American National Standards Institute, ANSI B151.27, 2003.
- [48] Richard, J.G., "Prévention intégrée à la conception : la contribution de l'ergonomie," in *Comptes-rendus 31^e Congrès annuel de l'Association canadienne d'ergonomie (ACE) « Ergonomie et sécurité »*, 1999, pp. 251-255.
- [49] Geadah, W. et Vega, P., "Dossier – Conformité des équipements," *Santé Sécurité +*, vol. 27, no. 3, pp. 5-8, 2010. [En ligne]. Disponible : <http://www.asfetm.com/Primavera/documents/RevueDecembre2010.pdf>. [Consulté le 20 septembre 2011].
- [50] Göttler, W., "Comment régler sans danger les machines à moulage par injection," Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents (CNA), Lucerne, Suisse, Feuillelet d'information sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles 1025, 1970.
- [51] Hauke, M. et al, "Functional safety of machine controls – Application of EN ISO 13849," Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Berlin, Allemagne, Rapport technique BGIA Report 2/2008e, 2009.

- [52] Siemens, " Functional Safety – Combination of a Power Contactor and a Circuit-Breaker," Siemens, Guide technique 40349715, 2010. [En ligne]. Disponible : <http://support.automation.siemens.com/WW/view/en/40349715>. [Consulté le 22 février 2011].

- [53] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Multifunction - Safe guard," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS0801/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/FBFD482F63B415C1852577890057F577/\\$File/safety-chain-solution-multifunction-safe-guard.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/FBFD482F63B415C1852577890057F577/$File/safety-chain-solution-multifunction-safe-guard.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [54] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – AS-Interface safety," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS09/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/B1A79BEB08216190852577890057EB51/\\$File/safety-chain-solution-as-interface-safety.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/B1A79BEB08216190852577890057EB51/$File/safety-chain-solution-as-interface-safety.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [55] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Light curtain," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS02/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/609557DA2C4768028525779D00529F19/\\$File/safety-chain-solution-light-curtain.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/609557DA2C4768028525779D00529F19/$File/safety-chain-solution-light-curtain.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [56] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Magnetic switches," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS06/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/D5F28EB00154B8C0852577890057F021/\\$File/safety-chain-solution-magnetic-switches.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/D5F28EB00154B8C0852577890057F021/$File/safety-chain-solution-magnetic-switches.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [57] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Multifunction - Two-hand control," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS0802/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/0ADDFAEFCBADA224852577890057E5C4/\\$File/safety-chain-solution-multifunction-two-hand-control.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/0ADDFAEFCBADA224852577890057E5C4/$File/safety-chain-solution-multifunction-two-hand-control.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [58] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Safe Stop 0," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS03/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/7EB80680B9DF4C9F85257786003B3C8A/\\$File/safety-chain-solution-safe-stop-0.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/7EB80680B9DF4C9F85257786003B3C8A/$File/safety-chain-solution-safe-stop-0.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [59] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Safe Stop 1 (Drive)," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS0401/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/667401991EEC7E84852577890057ED51/\\$File/safety-chain-solution-safe-stop-1-drive.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/667401991EEC7E84852577890057ED51/$File/safety-chain-solution-safe-stop-1-drive.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [60] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Safe Stop 1 (Servo)," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS0402/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/6078E14589475640852577890057EFDA/\\$File/safety-chain-solution-safe-stop-1-servo.pdf.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/6078E14589475640852577890057EFDA/$File/safety-chain-solution-safe-stop-1-servo.pdf.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [61] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Safe torque off," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS01/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/2D56870EAC943898852577890057EA58/\\$File/safety-chain-solution-safe-torque-off.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/2D56870EAC943898852577890057EA58/$File/safety-chain-solution-safe-torque-off.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [62] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Safety Mat," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS05/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/F2D4943100989B1B852577890057E089/\\$File/safety-chain-solution-safety-mat.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/F2D4943100989B1B852577890057E089/$File/safety-chain-solution-safety-mat.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [63] Schneider Electric Industries S.A.S, "Safety Chain Solution – Zero Speed detection," Schneider Electric Industries S.A.S, Rueil-Malmaison, France, Guide technique SCS07/0310 - 03-03-2010, 2010. [En ligne]. Disponible : [http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/8BBC462A82F7FDA7852577890057F06C/\\$File/safety-chain-solution-zero-speed-detection.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/85257689000007EE/all/8BBC462A82F7FDA7852577890057F06C/$File/safety-chain-solution-zero-speed-detection.pdf). [Consulté le 18 février 2011].

- [64] Sonet, J. et Sanlias, G., *Sécurité dans la transformation des matières plastiques – Tome II Conseils aux chefs d'entreprises de transformation de matières plastiques*, Paris : INRS, 1975.
- [65] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines — Parties des systèmes de commande relatifs à la sécurité — Partie 2 : Validation," *Comité européen de normalisation*, NF EN ISO 13849-2, 2008.
- [66] Organisation internationale de normalisation, "Sécurité des machines – Distances de sécurité empêchant les membres supérieurs et inférieurs d'atteindre les zones dangereuses," *Organisation internationale de normalisation*, ISO 13857, 2008.
- [67] Malchaire, J., "Stratégie générale de prévention des risques professionnels," *Cahiers de Médecine du Travail et Ergonomie*, vol. 3-4, no. XXXIV, pp. 159-165, 1997. [En ligne]. Disponible : http://www.deparisnet.be/sobane/fr/art_malchaire_art._strategie_gestion_risques_mte_98.pdf. [Consulté le 28 septembre 2011].
- [68] Ouellet, S., "Ergonomie et sécurité IND6403, partie 1," École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada, Note de cours Hiver 2010, 2010.
- [69] Gagnon, M., "Capture à la source : efficace et rentable," *Travail et santé*, vol. 27, no. 3, p. 24, 2011.
- [70] Fortin, M., "Cent fois sur le métier remettons notre ouvrage," in *Colloque IRSST – La perception et la communication du risque en santé et en sécurité du travail*, 2011. [En ligne]. Disponible : <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/fr/colloque-irsst-2011/michel-fortin-culture-en-sst-et-reconnaissance-des-risques-en-milieu-de-travail.pdf>. [Consulté le 6 décembre 2011].

- [71] Gozzo, J., "Horaires atypiques – Rester vigilant," *Institut national de recherche et de sécurité (INRS)*, 2010. [En ligne]. Disponible : http://kiosque.inrs.fr/lettre/archives/001/001_040.html#suite. [Consulté le 29 septembre 2011].
- [72] Foucault, C., "Automates programmables : les clés d'une migration réussie," *Industrie & Technologies*, no. 936, pp. 42-47, 2011.
- [73] Charpentier, P., Baudoin, J. et Bello, J.P., "Applying EN 62061 to designing a hydraulic press brake control system," in *The 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems*, 2010, pp. 1-6.
- [74] Boulanger, J.L. et al, "Application de la NF EN 62061 à la conception du système de commande d'une presse plieuse hydraulique," in *Sécurisation des architectures informatiques industrielles*, 1^{ère} éd., Cachan : Hermes Science Publications, 2011, pp. 181-225.
- [75] Groupe Cimax, "Trois outils logiciels pour évaluer ses boucles de sécurité," *Jautomatise*, Novembre - Décembre 2010, no. 73, pp. 33-35, 2010.
- [76] BEQUINOR, "Seguridad y fiabilidad de los sistemas de mando de máquinas e instalaciones automatizadas – La nueva Norma EN-ISO 13849," *Asociación Nacional de Normalización de Bienes de Equipo y Seguridad Industrial (BEQUINOR)*. [En ligne]. Disponible : <http://www.bequinor.org/DesktopModules/Announcements/AnnouncementDetail.aspx?ItemId=1258&alias=www.bequinor.org&ModuleId=403&TabId=67&PortalId=0>. [Consulté le 13 septembre 2011].

- [77] F.C., "Sécurité machine : une directive et une norme qui changent tout...", *PEI (Produits Équipements Industriels)*, vol. 21, no. 5, pp. 12-13, 2009. [En ligne]. Disponible : <http://media.tim-europe.com/Archives/PEI/2009/05/PEI.pdf>. [Consulté le 4 mai 2011].
- [78] Organisation internationale de normalisation, "Lignes directrices relatives à l'application de l'ISO 13849-1 et de la CEI 62061 dans la conception des systèmes de commande des machines relatifs à la sécurité," Organisation internationale de normalisation, ISO/TR 23849, 2010.
- [79] Arburg Inc., "Allrounder 221 K Technical Data," Arburg Inc., Allemagne, Manuel technique, 2004.
- [80] Isac, P., *Automatique industrielle : procéduriers de travaux pratiques*, septembre 2006, Montréal : École Polytechnique de Montréal, 2006.
- [81] Brown, S. et Vranesic, Z., *Fundamentals of Digital Logic with VHDL Design*, 2^{ème} édition, Toronto : McGraw-Hill, 1999.
- [82] Isac, P., "Automatique industrielle IND2106," École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada, Note de cours Automne 2010, 2010.
- [83] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), *SISistema (Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications)*, version 1.1.4, [Logiciel], Allemagne : IFA.
- [84] Bosch Rexroth AG, "Indices de fiabilité MTTF_d relatives à la sécurité fonctionnelle selon EN ISO 13849." Allemagne, Fiche technique RF 08012/03.10.

- [85] Technical committee n° 44 : Safety of machinery – elctrotechnical aspects, "Unconfirmed minutes of the meeting of IEC/TC 44 held on 7th – 8th April 2011 at the Czech Office for Standards, Metrology and Testing (UNMZ) Biskupsky Dvur 5 110 02 Prague," International electrotechnical commission, Prague, Czech Republic, Compte-rendu de réunion 44/637/RM, 2011.

- [86] Technical committee n° 44 : Safety of machinery – elctrotechnical aspects, "Notes on the 34th meeting of IEC/TC44 WG7 held at IFA, Sankt Augustin, Germany, March 16th to 18th 2011," International electrotechnical commission, Sankt Augustin, Germany, Compte-rendu de réunion IEC/TC44/WG7(Sec)522, 2011.

- [87] Commission électrotechnique internationale, "Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 1 : Prescriptions générales," *Commission électrotechnique internationale*, CEI 61508-1, 1998.

- [88] Debray, B., Chaumette, S., Descourière, S. et Trommeter, V., "Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle," Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Verneuil-en-Halatte, Oise, France, Rapport d'étude N° INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569, 2006.

- [89] Centre patronal de santé et de sécurité du travail du Québec, "Pour des employés plus responsables," *Infolettre SST Bonjour!*, vol. 3, no. 8, 2011. [En ligne]. Disponible : <http://www.centrepatronalsst.qc.ca/infos-sst/le-point-sur/culture-sst/employes-responsables.html>. [Consulté le 17 octobre 2011].

- [90] Chinniah, Y., Gauthier, F., Lambert, S. et Moulet, F., "Analyse expérimentale des outils d'estimation du risque associé aux machines industrielles," Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec, Canada, Rapport de recherche R-697, 2011.

- [91] Laplante, C. et Brouard, D., "Vient de paraître à la CSST," *Prévention au travail*, vol. 24, no. 3, p. 4, 2011.
- [92] Dépôt de données central et régional de la CSST, " Nombre de dossiers et débours totaux des lésions causées par des presses à injection (pour moulage de plastique) détaillées par genre, nature et siège de lésion par année, Québec 2002-2006," Québec, 2009, Compilation spéciale (non publiée).
- [93] Sick, " Trois grandes classes de normes," *Mesures*, no. 777, p. 58, 2005. [En ligne]. Disponible : <http://www.mesures.com/archives/777reglementation.pdf>. [Consulté le 13 septembre 2011].
- [94] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), " Seguridad de las maquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la Seguridad," *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*. [En ligne]. Disponible : <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=167e62a07b9e2210VgnVCM1000000705350aRCRD&vgnnextchannel=ac18b12ff8d81110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>. [Consulté le 13 septembre 2011].
- [95] Lubineau, P., " La directive machines, ses fondements et son champ d'applications," *Mesures*, no. 777, pp. 56-57, 2005. [En ligne]. Disponible : <http://www.mesures.com/archives/777reglementation.pdf>. [Consulté le 13 septembre 2011].
- [96] Le parlement européen et le conseil de l'union européenne, "DIRECTIVE 2006/42/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte)," *EUR-Lex*. [En ligne]. Disponible : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:FR:PDF>. [Consulté le 20 septembre 2011].

ANNEXE 1 – Zones dangereuses d’une presse à injection de plastique horizontale

ZONE DU MOULE	
Exemples de phénomènes dangereux [25]	Dommages associés [25]
Surfaces brûlantes (ex. : celles du moule)	Brûlures
Projection de matière (ex. : plastique chaud s’échappant du moule)	
Mouvement de fermeture du plateau mobile (y compris les mouvements dus à la gravité terrestre, p. ex. chute du moule serré inadéquatement contre le plateau)	Écrasement Cisaillement Choc
Mouvement de la buse à travers son passage dans le plateau fixe	
Mouvement des éjecteurs, des noyaux ⁹ et de leurs mécanismes	

ZONE DE L’OUVERTURE D’ÉVACUATION DES PIÈCES PRODUITES	
Exemples de phénomènes dangereux [25]	Dommages associés [25]
Mouvement des éléments de la zone du moule, accessibles par l’ouverture d’évacuation des pièces	Écrasement Cisaillement Choc

⁹ Noyaux : parties mobiles que l’on retrouve dans certains moules. Une fois le moule fermé, les noyaux se mettent en position pour compléter l’empreinte à donner à la pièce à produire, selon qu’une ou plusieurs cavités y sont requises.

ZONE DU MÉCANISME DE FERMETURE	
Exemples de phénomènes dangereux [25]	Dommmages associés [25]
Mouvement des mécanismes d'entraînement du plateau mobile	Écrasement Cisaillement Choc
Mouvement des mécanismes d'application de la force de fermeture du moule	
Mouvement d'ouverture du plateau mobile	
Mouvement des mécanismes des noyaux et des éjecteurs	

ZONE DE LA BUSE	
Exemples de phénomènes dangereux [25]	Dommmages associés [25]
Mouvement des unités de plastification et/ou d'injection	Écrasement Cisaillement
Mouvement de la vis sans fin (ex. : lors du changement de la vis)	Choc Happement
Surfaces brûlantes de la buse	Brûlures
Matière plastifiée brûlante dégagée de la buse	

ZONE DE L'UNITÉ DE PLASTIFICATION ET/OU D'INJECTION	
Exemples de phénomènes dangereux [25]	Dommmages associés [25]
Mouvements de la vis sans fin à l'intérieur du cylindre de plastification (accessible par l' OUVERTURE D'ALIMENTATION – zone dangereuse)	Écrasement Cisaillement Entraînement
Mouvement de la trémie vers le plateau fixe	
Mouvements du mécanisme d'injection	
Mouvements du mécanisme de plastification	
Surfaces chaudes de l'unité de plastification et/ou d'injection	Brûlures
Éjection de matières chaudes (ex. : plastique, gaz) suite à une dégradation de matière à cause de surchauffe ou de chauffe trop prolongée	

ANNEXE 2 – Presses à injection de plastique - débours de la CSST [92]

Nombre de dossiers et débours totaux des lésions causées par des presses à injection (pour moulage de plastique) détaillées par genre, nature et siège de lésion par année, Québec 2002-2006

			Année		Données											
			2002		2003		2004		2005		2006		Total Dossier		Total Débours	
Genre de lésion	Nature de la lésion	Siège de la lésion	Dossier	Débours	Dossier	Débours	Dossier	Débours	Dossier	Débours	Dossier	Débours				
Coincé ou écrasé par de l'équipement ou des objets, n.c.a.	Coupure, lacération (avec perte de substance)	Doigt(s), ongle(s), n.p.					1	716 \$					1		716 \$	
	Echymose, contusion	Doigt(s), sauf le pouce							1	124 \$			1		124 \$	
Total							1	716 \$	1	124 \$			2		840 \$	
Coincé par de l'équipement ou de la machinerie en marche	Blessure par écrasement	Sièges multiples membres supérieurs	1	1 131 \$									1		1 131 \$	
	Coupure, lacération (avec perte de substance)	Doigt(s), sauf le pouce	1	435 \$			1	1 137 \$					2		1 572 \$	
	Echymose, contusion	Sièges multiples	1	2 281 \$									1		2 281 \$	
	Luxation (comprend dislocation)	Doigt(s), sauf le pouce				1	1 695 \$						1		1 695 \$	
Total			3	3 847 \$	1	1 695 \$	1	1 137 \$					5		6 679 \$	
Contact avec des substances ou des objets chauds	Brûlure par chaleur, eau bouillante	Doigt(s), sauf le pouce							1	352 \$			1		352 \$	
		Jambe(s) inférieure(s) (bas jambe)				1	20 033 \$						1		20 033 \$	
		Main(s), sauf doigt(s) seulement									1	621 \$	1		621 \$	
	Brûlure, n.c.a.	Sièges multiples				1	4 129 \$						1		4 129 \$	
Total					2	24 162 \$			1	352 \$	1	621 \$	4		25 136 \$	
Effort excessif en tirant ou poussant des objets	Entorse, foulure, déchirure	Région cervicale (vertèbre cervic.)							1	5 756 \$			1		5 756 \$	
Total									1	5 756 \$			1		5 756 \$	
Explosion d'un contenant ou de canalisations sous pression	Brûlure par chaleur, eau bouillante	Main(s), sauf doigt(s) seulement	1	1 063 \$									1		1 063 \$	
Total			1	1 063 \$									1		1 063 \$	
Frappé par un objet volant ou une particule détaché	Echymose, contusion	Tête, n.p.					1	2 208 \$					1		2 208 \$	
Total							1	2 208 \$					1		2 208 \$	
Frappé par un objet, n.c.a.	Blessure muscles, tendon, ligament, artic., etc.	Thorax (côte et organe interne)				1	589 \$						1		589 \$	
Total						1	589 \$						1		589 \$	
Heurter un objet immobile	Fracture (comprend dent cassée)	Doigt(s), sauf le pouce					1	3 526 \$					1		3 526 \$	
Total							1	3 526 \$					1		3 526 \$	
Total général			4	4 910 \$	4	26 445 \$	4	7 587 \$	3	6 232 \$	1	621 \$	16		45 796 \$	

ANNEXE 3 – Détails sur les exemples d'accidents liés aux presses à injection et leurs équipements périphériques

EN FRANCE :

- **Écrasement du pouce** d'un monteur injecteur qualifié, **par la fermeture du moule** d'une presse à injection, tandis que **la victime retirait une carotte** (la carotte est le plastique durci formé durant le moulage des pièces produites et qui reste pris dans le plateau fixe de la zone du moule après l'éjection des pièces) [15].

Cause : démarrage intempestif du mouvement de fermeture du plateau mobile.

- **Écrasement du bras** d'un surveillant machine **par un carrousel** (équipement périphérique) évacuant des cintres produits par une presse à injection, alors qu'**il procédait au déblocage du carrousel**.

Cause : neutralisation du dispositif de sécurité du carrousel [15].

AU CANADA :

ONTARIO

- 14 avril 1993 : **Coincement mortel de la tête et des épaules** d'un travailleur dans la **zone de fermeture du moule** d'une presse à injection après qu'il ait ouvert le protecteur de l'opérateur **durant le mode automatique** de la machine, puis qu'il se soit penché dans la zone du moule et, avec son corps, ait actionné par mégarde un contact de fin de course avant.

Causes : non verrouillage des commandes de la machine et contact de fin de course non installé de manière à prévenir un démarrage accidentel [22] (alors, non-respect des principes de sécurité éprouvés mentionnés dans la norme *NF EN ISO 13849-2 : 2008* [65]).

QUÉBEC

- 5 janvier 1995 : Une travailleuse s'**écrase trois doigts** dans le **moule** d'une presse à injection de plastique **lors de la lubrification** d'une composante de moule.

Cause : méthode de travail non sécuritaire : en montant sur un escalier, elle a accédé à la zone du moule par le dessus, durant son fonctionnement automatique. Cette méthode de travail était imposée par l'employeur en raison de la forte compétition dans le secteur de la plasturgie. Cela lui permettait d'économiser les temps d'arrêt de la presse [29].

- 8 mai 2003 : Un **travailleur décède** suite au coincement de son bassin **entre le moule** (porté par un appareil de levage) d'une presse **et** la structure de métal d'**un carrousel** (équipement périphérique), tandis qu'il entreprenait des **changements et ajustements de moule**.

Causes : démarrage intempestif de l'appareil de levage vers le haut entraînant ainsi le moule vers la structure du carrousel, cadenassage non appliqué, station d'entretien du moule non opérationnelle, non-visibilité de la zone dangereuse de la presse depuis son bouton de réarmement, organisation déficiente du travail [23].

- 2 juin 2006 : Un monteur de moule a sa **main droite amputée** par la **fermeture du moule** d'une presse, pendant qu'il **débourrait le moule**.

Causes :

- envoi d'un signal erroné à l'automate programmable industriel (API) à cause d'une encoche non appropriée pratiquée dans le cadre du protecteur de la zone du moule ; ce signal erroné autorise le fonctionnement de la presse malgré l'ouverture de ce protecteur [30] ;
- FS peu fiables de la presse, car il est facile de contourner le système de sécurité [30] et l'apparition de défauts est possible : défauts électriques (ex. : « contamination de la boîte électrique avec de la poudre de carbone [30] »),

mécaniques (ex. : défaut au niveau d'un interrupteur du protecteur susmentionné). Finalement, les FS de la presse ne respectent que partiellement la catégorie B (catégorie de base) décrite dans la norme *ISO 13849-1* [2] alors que, normalement, selon le rapport d'accident [30], ces fonctions devraient respecter la catégorie 3 ou 4 assurant un niveau de sécurité supérieur ;

- gestion déficiente de la SST (ex. : insuffisance de contrôle de l'état des FS) [30].
- 12 juillet 2006 : Un mécanicien-superviseur est **mortellement écrasé** par la **fermeture du moule** d'une presse, alors qu'il y effectuait des **ajustements de production**.

Causes : méthode de travail dangereuse, accessibilité de la zone de fermeture du moule, neutralisation des dispositifs de sécurité, gestion déficiente de la SST [24].

Explication de la neutralisation des dispositifs de sécurité :

Le protecteur destiné à empêcher l'accès à la zone de fermeture du moule a été enlevé. Les dispositifs d'interverrouillage de ce protecteur ont été neutralisés afin que la machine puisse fonctionner même en l'absence du protecteur. Un tapis sensible initialement installé pour détecter toute présence dans la zone de moulage a été enlevé pour défectuosité. « Un branchement de contournement a été effectué dans la boîte de contrôle du tapis afin de simuler sa présence dans le circuit de l'automate programmable et ainsi permettre l'utilisation de l'extrudeuse sans contrainte [24]. »

ANNEXE 4 – Outil de collecte de données

Pour

L'activité de recherche :

« Sécurité des presses à injection de plastique ayant des équipements périphériques lors des interventions de maintenance et de production en entreprises »




Rempli par :

Date :

Consigne :

Pour remplir cet outil, obtenez l'information requise en interrogeant vos interlocuteurs, en demandant à un travailleur qualifié d'effectuer des essais de fonctionnement ou en observant l'environnement étudié. Tout au long de ce document, les symboles expliqués dans la légende suivante indiqueront comment obtenir l'information requise.

Légende :

	Poser la question pour obtenir l'information		Demander un essai (une démonstration) de fonctionnement pour obtenir l'information		Observer pour obtenir l'information
---	--	---	--	---	-------------------------------------

? Partie A : Prise de contact (à remplir en salle de réunion)

Identification de l'usine et des interlocuteurs :

U S I N E	I N T E R L O C U T E U R S			
	Prénom	Nom	Titre / Fonction dans l'usine *	Coordonnées
Nom :				
Effectif :				
Adresse :				

* Ex. : 1. Changeur de moule 2. Technicien en maintenance 3. Ingénieur 4. Responsable SST 5. Gestionnaire 6. Autre?

Interventions de maintenance et de production dans la zone du moule :

Caractérisation (poser les questions A.1 à A.5 à un technicien)

	Tâche	Motif de la tâche	Durée de la tâche	Fréquence de la tâche	Durée de présence dans la zone du moule	Cadenassage?	Autres méthodes? Précisez.
A.1						<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
A.2						<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
A.3						<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
A.4						<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
A.5						<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	

Système « presse-périphériques » étudié - Documentation pouvant être fournie :

- ☐ Analyse du risque (de la presse et/ou des périphériques)
- ☐ Validation de circuits de commande par un ingénieur
- ☐ Plans du système
- ☐ Fiches de cadénassage

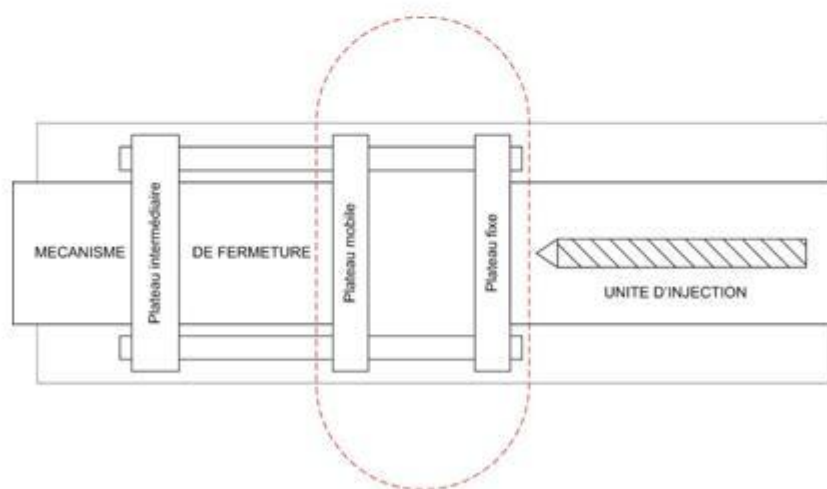
Partie B : Identification du système «presse-périphérique(s)» étudié

(à remplir devant le système étudié)



Identifiez et placez sur ce schéma les périphériques considérés et les moyens de protection :

- | | | | | |
|--|---|---|--------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Robot | <input type="checkbox"/> Convoyeur | <input type="checkbox"/> Palan/Pont roulant | <input type="checkbox"/> Granulateur | <input type="checkbox"/> Autre : _____ |
| <input type="checkbox"/> Protecteur de l'opérateur | <input type="checkbox"/> Protecteur de décharge | <input type="checkbox"/> Rideau lumineux | | |
| <input type="checkbox"/> Protecteur opposé à l'opérateur | <input type="checkbox"/> Système de blocage mécanique | <input type="checkbox"/> Cage | | |
| <input type="checkbox"/> Protecteur du dessus | <input type="checkbox"/> Tapis sensible | <input type="checkbox"/> Autre : | | |



VUE DE DESSUS

Partie B : Identification du système «presse-périphérique(s)» étudié *(suite)*

(à remplir devant le système étudié)

		?	②	Presse
B.1	Produits fabriqués par la presse au moment de la visite			
B.2	Marque			
B.3	Modèle / N° de série			
B.4	Année de fabrication			
B.5	Année d'installation			
B.6	Numéro d'identification dans l'usine			
B.7	Presse certifiée? Si oui, précisez (ex : CE).			
B.8	Tonnage			
B.9	Énergies présentes dans la zone du moule : hydraulique, électrique, pneumatique (ex. : au niveau des noyaux), autres			

		?	②	Périphérique 1	Périphérique 2	Périphérique 3	Périphérique 4
B.10	Type (ex. : robot parallèle; convoyeur)						
B.11	Fonction (ex. : récupérer carottes ou pièces; assembler)						
B.12	Marque						
B.13	Modèle / N° de série						
B.14	Année de fabrication						
B.15	Année d'installation						
B.16	Numéro d'identification dans l'usine						
B.17	Énergies présentes dans le périphérique						

C.4 Intégrateur des périphériques au système de commande de la presse :

☐ Personnel qualifié à l'interne ☐ Organisme externe ☐ Fabricant ☐ Autre :

C.5 Intégration faite à partir des plans de la presse et des périphériques : ☐ Oui ☐ Non

C.6 Encadrement de l'intégration par : ☐ Concepteur ☐ Fabricant ☐ Vendeur
☐ Autre :

C.7 Coordination « presse-périphériques » :

- ☐ Gestion du système par un même API
- ☐ Communication entre les APIs de chaque
- ☐ API(s) dédié(s) à la sécurité

Remarque :

C.8 Démarche pour passer de « presse » à « presse-périphérique(s) » :

Conditions d'activation? Sur quels organes de commande appuyer?

Quels changements des moyens de protection cela implique-t-il ?

- ☐ Neutralisation d'un protecteur ou dispositif de protection (ex. : la machine " croit " que le protecteur est fermé)
- ☐ Autorisation de fonctionner avec protecteur ouvert (la machine " sait " que le protecteur est ouvert)
- ☐ Autre :

C.9 Démarche pour passer de « périphérique(s) » à « presse-périphérique(s) » :

(ex. : Conditions d'activation? Sur quels organes de commande appuyer? Changement de programme ou de branchement?
Neutralisation de moyens de protection?)

Éléments mobiles - Maîtrise du système « presse-périphériques » par l'intervenant dans la zone étudiée

C.10 Mesures de prévention contre un démarrage par un tiers ? (L : 22, 29, 32)

C.11 Protection contre un démarrage INTÉMPÊTIF ? (L : 2, 4, 30)



Partie D : Identification des risques

(à remplir devant le système « presse-périphérique(s) » étudié)

Phénomènes dangereux, événements dangereux ou dommages potentiels auxquels sont exposés les travailleurs au cours de leurs interventions de maintenance et de production dans la zone du moule du système :

- ☐ 1. Coincement / écrasement par l'ouverture du moule
- ☐ 2. Coincement / écrasement par la fermeture du moule
- ☐ 3. Coincement par les éjecteurs ou les noyaux
- ☐ 4. Chute du moule
- ☐ 5. Heurt par le moule ou l'appareil de levage
- ☐ 6. Heurt par un robot en mouvement
- ☐ 7. Entraînement et coincement par un convoyeur
- ☐ 8. Électrisation / électrocution (énergie électrique)
- ☐ 9. Risque thermique - brûlures par : le moule, des projections de plastique ou de gaz
- ☐ 10. Autre :

Cette liste permet de vérifier les risques présents dans la zone du moule de la presse ayant des périphériques. La remplir permet de savoir rapidement quels chapitres de la section suivante seront applicables au système.

Partie E : Moyens de réduction du risque

(Répondre aux questions devant le système « presse-périphérique(s) »)

Arrêt d'urgence et réarmement



Type d'arrêt d'urgence (AU):

Organe(s) d'AU facilement accessible(s) depuis la zone du moule ? _____

☐ **Câble** → Nombre : _____

Tendu : ☐ Oui ☐ Non

Facilement remarquable : ☐ Oui ☐ Non

☐ **Bouton** → Nombre : _____

☐ Rouge ☐ Non encastré ☐ Type champignon ☐ Sur fond jaune

Facilement remarquable : ☐ Oui ☐ Non

☐ **Pédale** → Nombre : _____

☐ Facilement accessible (aucun capot protecteur)

☐ **Barre** → Nombre : _____

☐ **Manette** → Nombre : _____



Effet de l'AU :

AU_{presse} agit sur :

☐ Presse ☐ Tous les périphériques ☐ Une partie des périphériques : _____

AU_{chaque périphérique} agit sur :

☐ Presse ☐ Tous les périphériques ☐ Une partie des périphériques : _____

☐ Périphérique correspondant



Réarmement manuel requis pour démarrer le système après l'activation de l'AU : ☐ Oui ☐ Non

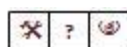


Y-a-t-il un réarmement :

☐ Pour la presse ?

☐ Par périphérique ?

☐ Pour l'ensemble " presse-périphérique(s) " ?



E.1 Fermeture / ouverture du moule et coincement par les éjecteurs ou les noyaux - Moyens contre ces risques

N.B. Répondre en premier aux questions **et ?**

Identification des dispositifs de protection :

Observations :	
<input type="checkbox"/> Système de blocage mécanique du moule	Barre : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Fonctionnel ? _____ Autre : _____
<input type="checkbox"/> Tapis sensible	
<input type="checkbox"/> Rideau lumineux	
<input type="checkbox"/> Autre :	

Identification des protecteurs :

	③ Fixe	Mobile		③ Nombre de détecteurs de positions du protecteur	③ Nature des détecteurs de position (capacitif ou inductif, électromécanique à came ou à clé, etc.)
		Verrouillé	Interverrouillé		
<input type="checkbox"/> Protecteur de l'opérateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> Protecteur opposé à l'opérateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> Protecteur du dessus	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> Protecteur de décharge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> Autre :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Remarque :

--

Efficacité des dispositifs de protection

✖ Essais à faire en mode manuel!

✖ Ne pas se mettre dans la zone du moule pour faire les essais!

		Système de blocage mécanique du moule	Tapis sensible	Rideau lumineux
	Enclencher le blocage mécanique, appuyer sur le tapis ou occulter le rideau :			
✖	→ empêche la fermeture du plateau mobile	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
✖	→ empêche le mouvement des éjecteurs	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
✖	→ empêche le mouvement de quels autres éléments mobiles du système?			
?	Dans quels modes ?	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel
✖	→ permet le mouvement de quels éléments mobiles du système ?			
?	Dans quels modes ?	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-automatique <input type="checkbox"/> Manuel
✖	Redémarrage volontaire requis pour faire bouger des éléments mobiles du système après que les rideaux ne soient plus occultés ou que le tapis ne soit plus appuyé	Non applicable	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

Remarque :

Efficacité des protecteurs

✖ Essais à faire en mode manuel !

	Protecteur op.	Protecteur ≠ op.	Protecteur dessus	Protecteur décharge
Ouvrir un protecteur :				
✖ → arrête instantanément ou empêche la fermeture du plateau mobile	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
✖ → arrête instantanément ou empêche le mouvement des éjecteurs	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
✖ → arrête ou empêche le mouvement de quels autres éléments mobiles du système ?				
?? Dans quels modes ?	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel
✖ → permet le mouvement de quels éléments mobiles du système ?				
?? Dans quels modes ?	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel	<input type="checkbox"/> Automatique <input type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Manuel
✖ Redémarrage volontaire requis pour faire bouger des éléments mobiles du système après avoir replacé un protecteur	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

🔗 Schématiser les détecteurs de position sur les moyens de protection en indiquant s'ils sont à ouverture forcée des contacts (⊖) ou montés en actionnement positif (⊕)

Protecteur op.	Protecteur ≠ op.	Protecteur dessus	Protecteur décharge

Efficacité générale des protecteurs et dispositifs de protection

④ Zone entre les plateaux accessible malgré les protections en place :

☐ Non

☐ Oui. Expliquez :

Remarque :

? ② E.2 Chute du moule - Moyens contre ce risque

② Appareil de levage utilisé pour soulever le moule :

② / ? Charge maximale que peut supporter l'appareil de levage :

? Poids du plus grand moule déjà installé sur cette presse :

? Fréquence de l'inspection de l'appareil de levage :

? Vérifications faites avant l'utilisation d'un œillet :

☐ Charge maximale

☐ État de l'œillet

☐ Autre

? Vérifications faites avant l'utilisation des brides de serrage :

☐ État des brides

☐ Autre

Remarques / Autres moyens de réduction de ce risque :

? ② E.3 Heurt par le moule ou l'appareil de levage - Moyens contre ce risque

Moyens de réduction de ce risque :

E.4 Mouvement d'un robot - Moyens contre ce risque


 Robot encagé : ☐ Oui ☐ Non ☐ Autre :

 Enceinte du robot accessible malgré la cage :




☐ Non

☐ Oui. Expliquez :


 Ouvrir la cage empêche les mouvements de quels éléments mobiles du système ?


 Ouvrir la cage permet les mouvements de quels éléments mobiles du système ?

 Poignée de validation ou un pendant : ☐ Oui ☐ Non

 Schéma de la cage avec ses portes et les interrupteurs de positions ( , ) des portes :

E.5 Entraînement et coincement par un convoyeur - Moyens contre ce risque

 Protecteur d'angles rentrants : ☐ Oui ☐ Non

 Protecteur contre les zones de coincement : ☐ Oui ☐ Non

Remarques / Autres moyens de réduction de ce risque :


E.6 Énergie électrique - Moyens contre ce risque

 Tension électrique en jeu : _____, Où ? : _____

Remarques / Autres moyens de réduction de ce risque :

E.7 Risque thermique - Moyens contre ce risque

Moyens de protection : voir protecteurs appartenant à la presse cités en E.1

 Port d'EPI au cours des observations du système étudié :

☐ Gants ☐ Lunettes de sécurité ☐ Cagoule ☐ Autres : _____

Mesurez la température du moule lors de l'opération observée : $T_{\text{moule}} = \text{_____}^{\circ}\text{C}$

Opération effectuée lors de la prise de température du moule : _____

Opération observée :

Noter : méthode d'intervention de l'opération observée, situations dangereuses et facteurs de risque.

ANNEXE 5 – Étapes observées pour les tâches exécutées lors des visites en usines

Démontage de moule (tâche réalisée par 1 travailleur : monteur-ajusteur de moule de l'usine A) :

Au début du démontage, le moule est ouvert, ainsi que le protecteur de l'opérateur. Les étapes observées pour le démontage de moule sont les suivantes :

- vidanger le moule ;
- rabattre la partie mobile du moule sur sa partie fixe en actionnant la fermeture du plateau mobile ;
- insérer le (les) crochet (s) du pont roulant dans l'œillet (les œillets) du moule ;
- débrancher les flexibles du moule ;
- enlever les brides de serrage ou les boulons qui fixaient le moule au plateau mobile ;
- enlever les brides de serrage ou les boulons qui fixaient le moule au plateau fixe ;
- soulever le moule avec le pont roulant ;
- ranger, sur le moule, les flexibles qui lui sont propres ;
- poser le moule doucement sur le sol.

Montage de moule (tâche réalisée par 1 ou 4 travailleurs : régisseurs et monteurs-ajusteurs de moule des usines A, B et C)

Au départ, les parties fixe et mobile du moule sont généralement solidarisées et le protecteur de l'opérateur est ouvert. Il est arrivé pour l'une des visites que la masse du moule dépasse la capacité maximale du pont roulant. Par souci de sécurité, le montage de moule s'est fait en deux temps : installation de la partie fixe du moule, puis de sa partie mobile, dont les poids respectifs étaient inférieurs à la capacité maximale du pont roulant. À notre arrivée dans cette usine, la partie fixe du moule était déjà boulonnée au plateau fixe. Nous avons donc assisté à la fixation de la partie mobile du moule et au

reste du montage de moule. Globalement, lors des visites, les montages de moule s'exécutaient ainsi :

- si présence d'un robot, le positionner à sa position initiale (*home*) et l'éteindre ou le débrancher sans le cadenasser. Cadenasser le robot n'est pas exigé, car une confiance au système de commande relatif à la sécurité s'est installée ;
- insérer le (les) crochet (s) du pont roulant dans l'œillet (les œillets) du moule ;
- déplacer le moule vers la zone du moule en actionnant le pont roulant depuis son pendant ;
- positionner le moule de manière à ce que son orifice d'injection soit vis-à-vis l'orifice d'insertion de la buse ;
- installer les brides de serrage ou les boulons pour accrocher la partie fixe du moule au plateau fixe ;
- installer les éjecteurs sur la partie mobile du moule de sorte que le mécanisme d'éjection de la presse coïncide avec eux ;
- actionner la fermeture du plateau mobile de manière à ce qu'il s'appuie contre la partie mobile du moule ;
- installer les brides de serrage ou les boulons pour accrocher la partie mobile du moule au plateau mobile ;
- enlever le crochet du pont roulant de l'œillet du moule ;
- désolidariser la partie fixe de la partie mobile du moule (les deux parties sont liées par une bride) ;
- brancher, s'il y a lieu, les capteurs électriques au moule (ces capteurs informent l'API du système de la position des éléments mobiles de la zone du moule : plateau mobile, éjecteurs, noyaux) ;
- installer les flexibles d'eau froide et d'eau chaude du moule ;
- installer, s'il y a lieu, les flexibles hydrauliques du moule (ces flexibles peuvent être requis pour brancher les vérins hydrauliques actionnant les noyaux du moule) ;

- s'il y a un robot interagissant avec la presse, le réarmer ;
- régler les paramètres de la presse conformément au type de pièce à produire ;

Essais de production (tâche réalisée par 1 client et 2 travailleurs : monteurs-ajusteurs de moules et régleurs de l'usine C)

Lors des essais de production, la presse fonctionne en mode semi-automatique : à la fin de chaque cycle, le travailleur va récupérer la pièce produite. Les essais de production sont réalisés selon les étapes suivantes :

- régler les paramètres de la presse depuis sa console ;
- vérifier la vitesse de fermeture et d'ouverture du plateau mobile, la pression de fermeture et le verrouillage du moule après fermeture de celui-ci (ces essais s'alternent souvent avec des ajustements de paramètres)
- vérifier l'injection adéquate du plastique (le plastique est injecté dans la partie fixe du moule ouvert ; il ressort donc par les orifices de l'empreinte.
- entrer dans la zone du moule pour enlever, à l'aide d'air comprimé, le plastique éjecté (rôle de l'air comprimé : sécher le plastique chaud pour qu'il soit complètement dégagé de l'empreinte et de ses orifices ;
- le client vérifie qu'après l'enlèvement du plastique de l'empreinte, celle-ci ne soit pas abîmée. Il inspecte les orifices de l'empreinte avec une lampe de poche ;
- procéder aux essais de production des 2 premières pièces ;
- connecter les capteurs de position des éjecteurs (ceci est pour assurer la sécurité du moule, ainsi il ne se refermera pas si les éjecteurs sont sortis) ;
- poursuivre avec les essais de production de pièces (la plupart des essais de production de pièces s'alternent avec une inspection de l'empreinte) ;
- si, entre 2 essais, la presse n'a rien injecté durant 5 min, purger le moule pour le vider du plastique quelque peu solidifié. Puis rentrer dans la zone du moule pour sécher le plastique éjecté du moule avec de l'air comprimé et l'enlever ;
- après chaque pièce produite, descendre dans la zone du moule pour la récupérer et la vérifier avec le client ;

- lors des essais, le client a remarqué que les pièces étaient difficiles à enlever à cause de leurs carottes qui restaient collées contre la partie mobile du moule. Dans l'éventualité où un robot vient récupérer les pièces, il aura du mal à dégager les pièces et la presse risque d'avoir des arrêts fréquents. Alors, le client et son assistant ont enlevé avec une fraiseuse (portative et électrique), une partie du matériau de l'éjecteur de carotte pour qu'il retienne moins la pièce produite et facilitent son retrait ;
- après le fraisage, le client a nettoyé l'empreinte de la partie mobile du moule et ses orifices avec de l'air comprimé ;
- comme le fraisage a dépassé 5 min, une purge de la partie fixe du moule fut nécessaire pour le libérer du plastique quelque peu solidifié.

Installation d'inserts sur le moule (tâche réalisée par 1 travailleur : technicien en changement de moule, réglage et mise en route de l'usine D)

Cette tâche s'entreprend sur le moule installé contre les plateaux fixe et mobile. Voici les étapes liées à cette intervention :

- éteindre le moteur hydraulique avant d'ouvrir la cage ;
- ouvrir la cage (un voyant rouge s'allume) ;
- garder l'énergie électrique sur la presse ;
- placer les inserts sur les parties fixe et mobile du moule ;
- boulonner les inserts sur le moule ;
- sortir de la presse et de la cage ;
- réarmer le robot.

Inspection, polissage et nettoyage de l'empreinte du moule (tâche réalisée par 2 clients et 1 travailleur : le polisseur de l'usine C)

Cette opération de maintenance est ainsi réalisée :

- le client inspecte le moule (il est debout dans la zone du moule, sur des tapis sensibles) ;

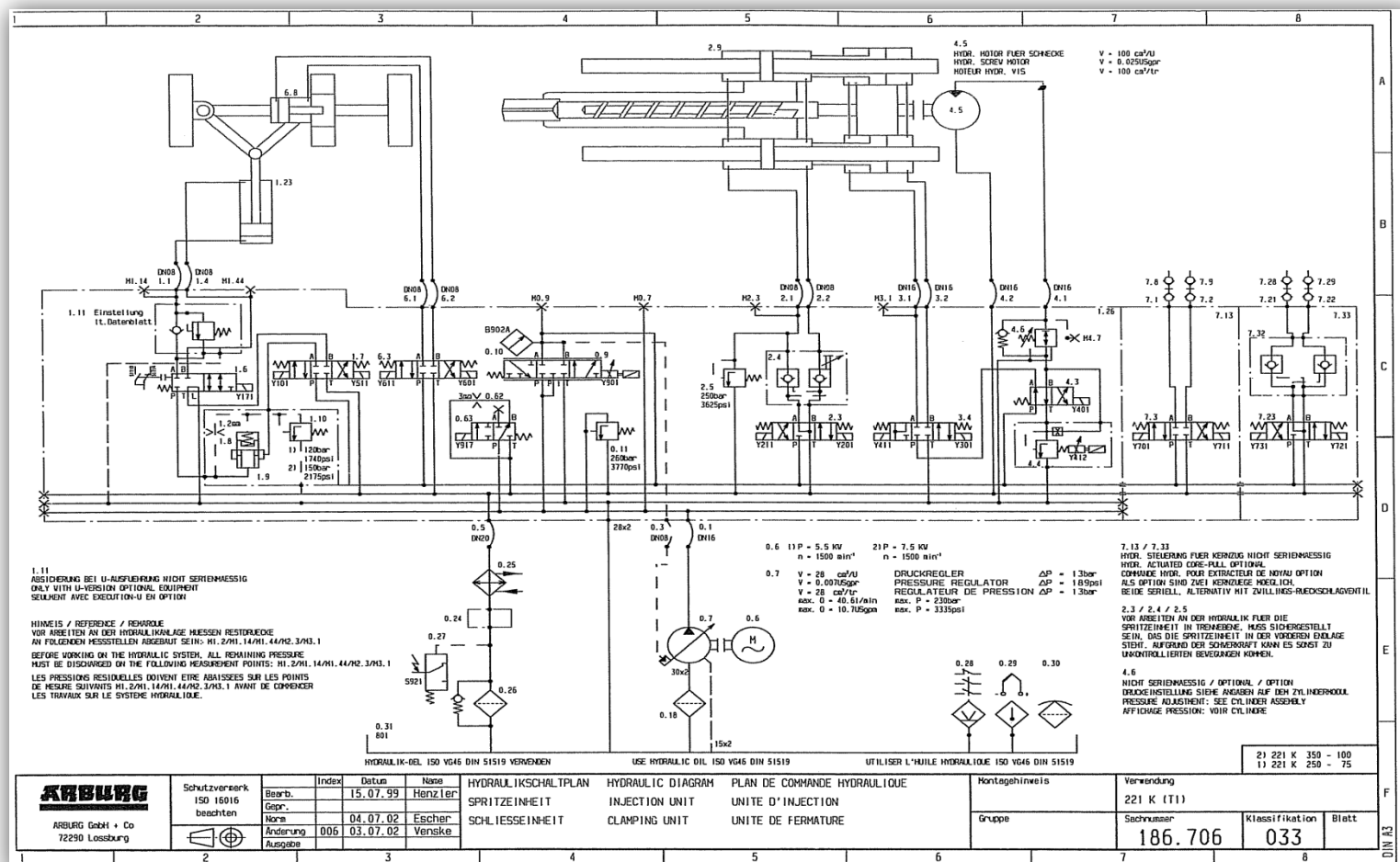
- le client nettoie certaines parties de l’empreinte du moule avec un morceau de coton (puis, le client laisse la zone du moule) ;
- à la demande du client, un polisseur nettoie (avec un morceau de coton) l’empreinte et la polit, par endroits, avec une fraiseuse (portative, électrique) ;
- le polisseur colmate des fissures de l’empreinte avec de la pâte;
- le client inspecte le moule une dernière fois.

ANNEXE 6 – Classification des normes françaises et internationales en sécurité des machines

Dans l'introduction des normes françaises et internationales en sécurité des machines, il est mentionné que dans ce domaine, les normes sont classées selon trois types. De même, Sick [93] indique qu'il existe trois grandes classes de normes en sécurité des machines :




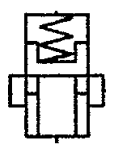
- **Type A** : regroupe les normes traitant des aspects fondamentaux et généraux propres aux machines (ex. : *ISO 12100:2010* [19]) ;
- **Type B** : se subdivise en deux sous-types :
 - B1 portant sur un aspect de la sécurité des machines (ex. : *NF EN ISO 13849-1:2008*) ;
 - B2 concernant les dispositifs qui conditionnent la sécurité (ex. : *ISO 13850 Arrêts d'urgence*) ;
- **Type C** : les normes de type C sont des normes portant sur les exigences de sécurité propre à une machine bien précise ou à un groupe de machines (ex. : *NF EN 201:2009* [25]). Si des principes de sécurité mentionnés dans une norme de type C diffèrent de ceux d'une norme de type A ou B, ce sont les principes de la norme de type C qui ont préséance.

ANNEXE 7 – Circuit hydraulique de la presse de l'IRSST [79]



ANNEXE 8 – Circuit hydraulique : identification et rôle des composants

Le tableau suivant explique la fonction des composants du circuit hydraulique, de la figure 3.3, intervenant dans les mouvements d'ouverture et de fermeture du plateau mobile de la presse de l'IRSST.

Composant	Symbole	Fonction
Vérin « V » : vérin à double effet, à simple tige (actionneur)		Actionner les mouvements d'ouverture et de fermeture du plateau mobile, par l'intermédiaire du mécanisme à genouillère.
Clapet antiretour		Lors du mouvement d'ouverture, empêcher que le flux hydraulique s'échappant de la chambre arrière du vérin ne le traverse ; ce qui réoriente ce flux vers le limiteur de pression. Lors du mouvement de fermeture, permettre à tout le flux provenant du réservoir hydraulique de se rendre directement à la chambre arrière sans passer par le limiteur de pression.
Limiteur de pression		Réguler la pression d'ouverture du plateau mobile pour éviter des à-coups lors du mouvement d'ouverture. Assurément, dans l'optique de préserver la qualité des produits moulés par la presse.
Clapet piloté		Améliorer la régulation de pression entamée par le limiteur de pression lors du mouvement d'ouverture du plateau mobile. Lors du mouvement de fermeture, le flux hydraulique y circule normalement : aucune régulation de pression n'y est faite.

Composant (suite)	Symbole (suite)	Fonction (suite)
Distributeur « D1 » (préactionneur) : distributeur 4/3 monostable, à commandes électriques par électro-aimant à un enroulement (Y101 et Y511)		Permettre, par chacune de ses commandes, le passage du flux hydraulique contribuant au mouvement de fermeture ou d'ouverture du plateau mobile. Ce distributeur est en série avec le distributeur « D2 ».
Distributeur « D2 » (préactionneur) : distributeur 5/2 monostable, à commande électrique par électro-aimant à un enroulement (Y171) Note : les capteurs S171A et S171B de « D2 » informent de la position de son tiroir.		Compléter la commande de fermeture ou d'ouverture du plateau mobile transmise au vérin « V ». En d'autres termes, ce distributeur valide la commande de fermeture ou d'ouverture provenant du distributeur « D1 ».

ANNEXE 9 – Bref rappel sur la logique booléenne

Pour faciliter la compréhension du document, précisons quelques notions booléennes :

fonction binaire : fonction ne pouvant prendre que deux états, soit vrai (ou activé, c.-à-d. 1) ; soit faux (ou désactivé, c.-à-d. 0) ;

mot binaire : combinaison de bit (ex. : 101 ; 0010) ;

table de vérité : tableau déterminant la sortie d'une fonction binaire selon les mots binaires qu'elle reçoit en entrée.

Dans le cadre de l'étude, trois fonctions élémentaires du langage booléen seront utilisées : la fonction « ET », la fonction « OU », la fonction « NON ». En électricité, par exemple, la fonction « ET » est matérialisée par des éléments (entrées de la fonction) montés en série ; tandis que la fonction « OU » est matérialisée par des éléments (entrées de la fonction) montés en parallèle. Voici la table de vérité de chacune de la fonction « ET » et de la fonction « OU » :

Entrées		Sortie	Entrées		Sortie
a	b	« ET »	a	b	« OU »
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1

Ainsi, la fonction « ET » devient vraie (s'active) si et seulement si toutes ses entrées sont vraies (sont activées). Pour que la fonction « OU » devienne vraie (s'active) il faut qu'au moins une de ses entrées soit vraie (soit activée).

Quant à la fonction « NON », elle traduit le contraire de son entrée. Par exemple, si une fonction « N » vaut « non "a" », nous aurons $N = 0$ si $a = 1$, $N = 1$ si $a = 0$. L'équation logique de la fonction « N » s'écrira : $N = \bar{a}$, et se lira : « N = non a », ou « N = a barre ».

ANNEXE 10 – Comportement de la FS en présence de défauts

A10.1 Défaut unique : interrupteur S151A bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : S151A bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts de l'interrupteur S151A restent ouverts puisqu'il reste bloqué à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés, car aucun défaut). Cependant, les contacts de l'interrupteur S151A demeurent ouverts à cause de son défaut.

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec S151A bloqué à 0 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. Les relais K01 et K02 sont désactivés, alors $K01 = 0$ et $K02 = 0$. 2. Le relais K03 s'active, car $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{0}$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 1$ 3. Même si K03 vaut 1, le relais K01 reste désactivé ($K01 = 0$), car l'alimentation électrique ne lui parvient pas, les contacts de S151A restant ouverts. 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : $Y171 = 1$, car les contacts de S175 sont fermés et celui-ci est alimenté électriquement.</p>

Fonctionnement avec S151A bloqué à 0 - protecteur de l'opérateur fermé (suite) :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>Par ailleurs, K02 vaut 1 :</p> $K02 = K03 + K02$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K02 = 1$ <p>4. K03 tombe à 0 aussitôt que K02 s'active.</p> <p>5. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car</p> $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 1 \cdot 0$ $= 1 \cdot 1 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$	
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : S151A bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : S151A bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de S151A restent ouverts à cause du défaut. Les contacts de S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut. Ainsi, l'alimentation électrique est coupée au niveau de tous les embranchements de circuits découlant de ces trois interrupteurs. Alors, Y101 et Y171 sont désactivées. L'ordre « FERMER » n'est donc pas autorisé.

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : S151A bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : S151A bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « S151A bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car cette défaillance n'active pas K01 qui est une des conditions permettant l'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.2 Défaut unique : interrupteur S151A bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : S151A bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts de l'interrupteur S151A restent fermés puisqu'il reste bloqué à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés, car aucun défaut). Cependant, les contacts de l'interrupteur S151A demeurent fermés à cause de son défaut.

Fonctionnement du circuit analysé :

Le circuit fonctionne exactement tel que décrit au tableau 3.7 intitulé : « Fonctionnement normal avec protecteur de l'opérateur fermé ».

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : S151A bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : S151A bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de S151A restent fermés à cause du défaut. Les contacts de S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut. Ouvrir le protecteur aura l'effet suivant sur le circuit :

Fonctionnement avec S151A bloqué à 1 - le protecteur de l'opérateur s'ouvre :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. Le relais K01 reste activé malgré l'ouverture du protecteur, à cause de l'alimentation électrique qui lui parvient via l'interrupteur S151A qui reste bloqué à 1. 2. Le relais K02 se désactive, car l'ouverture du protecteur sépare les contacts de S151B. Alors, aucun courant n'y circule : $K02 = 0$. 3. Le relais K03 est désactivé : $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{1} \cdot \overline{0}$ $= 0 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 0$ 4. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 1$ $= 1 \cdot 0 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$ 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive. Aucune alimentation électrique ne lui parvient puisque l'interrupteur S175 a ses contacts ouverts par l'ouverture du protecteur : $Y171 = 0$.</p>

Fonctionnement avec S151A bloqué à 1 - le protecteur de l'opérateur s'ouvre (suite) :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $\text{FERMER} = \text{Y171} \cdot \text{Y101}$ $= 0 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : S151A bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : S151A bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « **S151A bloqué à 1** » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car cette défaillance active K01 qui est une des conditions permettant l'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.3 Défaut unique : relais K01 bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K01 bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K01 restent ouverts puisqu'il reste bloqué à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K01 bloqué à 0 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>1. K01 = 0, car il est bloqué à 0. Comme on vient d'alimenter le circuit, K02 est désactivé : $K02 = 0$, car $K02 = K03 + K02$, or $K03 = 0$.</p> <p>2. Le relais K03 s'active, car $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{0}$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 1$</p> <p>3. Même si K03 vaut 1, le relais K01 reste désactivé ($K01 = 0$), car ses contacts restent ouverts (défaut).</p> <p>Par ailleurs, K02 vaut 1 : $K02 = K03 + K02$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K02 = 1$</p> <p>4. K03 tombe à 0 aussitôt que K02 s'active.</p> <p>5. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{1} \cdot 1 \cdot 0$ $= 0 \cdot 1 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$</p>	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : $Y171 = 1$, car les contacts de S175 sont fermés.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : K01 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K01 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de K01 restent ouverts à cause du défaut. Les contacts de S151A, S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut. Ainsi, l'alimentation électrique est coupée au niveau de tous les embranchements de circuits découlant de ces trois interrupteurs. Alors, Y101 et Y171 sont désactivées. L'ordre « FERMER » n'est donc pas autorisé.

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K01 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K01 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « K01 bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car cette défaillance n'active pas K01 qui est une des conditions permettant l'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.4 Défaut unique : interrupteur K01 bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K01 bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K01 restent fermés puisqu'il reste bloqué à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K01 bloqué à 1 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. K01=1 à cause du défaut. Comme on vient d'alimenter le circuit, K02 est désactivé : K02 = 0. 2. Le relais K03 s'active, car $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{1} \cdot \overline{0}$ $= 0 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 0$ 3. Le relais K02 reste désactivé, car : $K02 = K03 + K02$ $= 0 + 0$ $\rightarrow K02 = 0$ 4. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 1$ $= 1 \cdot 0 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$ 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : Y171 = 1, car les contacts de S175 sont fermés.</p>

Fonctionnement avec K01 bloqué à 1 - protecteur de l'opérateur fermé (suite) :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :</p> $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : K01 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K01 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de S151A, S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut.

Fonctionnement avec K01 bloqué à 1 - le protecteur de l'opérateur s'ouvre :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. K01 = 1 en raison de son défaut. K02 = 0, car les contacts de S151B s'ouvrent. 2. K03 = 0, car les contacts de S151A sont ouverts. 3. La commande Y101 du distributeur « D1 » s'active, car $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 1$ $= 1 \cdot 0 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$ 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive : Y171 = 0, car les contacts de S175 s'ouvrent.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :</p> $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 0 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K01 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K01 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « **K01 bloqué à 1** » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car cette défaillance active K01 qui est l'une des conditions d'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.5 Défaut unique : relais K02 bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K02 bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K02 restent ouverts puisqu'il reste bloqué à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K02 bloqué à 0 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<p>1. K02 = 0, car il est bloqué à 0. Comme on vient d'alimenter le circuit, K01 est désactivé : $K01 = 0$, car $K01 = K03 + K01$, or $K03 = 0$.</p> <p>2. Le relais K03 s'active, car $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{0}$ $= 1 \cdot 1$ $\rightarrow K03 = 1$</p> <p>3. Même si K03 vaut 1, le relais K02 reste désactivé ($K02 = 0$), car l'alimentation électrique ne lui parvient pas, ses contacts restants ouverts (défaut).</p> <p>Par ailleurs, K01 vaut 1 : $K01 = K03 + K01$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K01 = 1$</p> <p>4. K03 tombe à 0 aussitôt que K01 s'active.</p> <p>5. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 1$ $= 1 \cdot 0 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$</p>	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : $Y171 = 1$, car les contacts de S175 sont fermés.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : K02 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K02 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de K02 restent ouverts à cause du défaut. Les contacts de S151A, S151B et S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut. Ainsi, l'alimentation électrique est coupée au niveau de tous les embranchements de circuits découlant de ces trois interrupteurs. Alors, Y101 et Y171 sont désactivées. L'ordre « FERMER » n'est donc pas autorisé.

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K02 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K02 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « K02 bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car cette défaillance n'active pas K02 qui est une des conditions d'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.6 Défaut unique : interrupteur K02 bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K02 bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K02 restent fermés puisqu'il reste bloqué à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K02 bloqué à 1 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
1. K02 = 1 à cause du défaut. Comme on vient d'alimenter le circuit, K01 est désactivé : K01 = 0. 2. Le relais K03 s'active, car $K03 = \overline{K01} \cdot \overline{K02}$ $= \overline{0} \cdot \overline{1}$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow K03 = 0$ 3. Le relais K01 reste désactivé, car : $K01 = K03 + K01$ $= 0 + 0$ $\rightarrow K01 = 0$ 4. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 1 \cdot 0$ $= 1 \cdot 1 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$	La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : Y171 = 1, car les contacts de S175 sont fermés.

Fonctionnement avec K02 bloqué à 1 - protecteur de l'opérateur fermé (suite) :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée : $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : K02 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K02 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de S151A, S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut.

Fonctionnement avec K02 bloqué à 1 - le protecteur de l'opérateur s'ouvre :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
1. K02 = 1 en raison de son défaut. K01 = 0, car les contacts de S151A s'ouvrent. 2. K03 = 0, car les contacts de S151A sont ouverts. 3. La commande Y101 du distributeur « D1 » s'active, car : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 1 \cdot 0$ $= 1 \cdot 1 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$	La commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive : Y171 = 0, car les contacts de S175 s'ouvrent.
Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée : $\text{FERMER} = Y171 \cdot Y101$ $= 0 \cdot 0$ $\rightarrow \text{FERMER} = 0$	

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K02 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K02 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « **K02 bloqué à 1** » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car cette défaillance active K02 qui est une des conditions d'activation de la commande Y101 du distributeur « D1 ».

A10.7 Défaut unique : relais K03 bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K03 bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K03 restent ouverts puisqu'il reste bloqué à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K03 bloqué à 0 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. Comme on vient d'alimenter le circuit, K01 et K02 sont désactivés : $K01 = 0$ et $K02 = 0$. 2. $K03 = 0$, car ses contacts restent ouverts en raison du défaut. 3. K01 reste désactivé, car $K01 = K03 + K01$ $= 0 + 0$ $\rightarrow K01 = 0$ <p>De même pour K02, car</p> $K02 = K03 + K02$ $= 0 + 0$ $\rightarrow K02 = 0$ 4. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{0} \cdot 0 \cdot 0$ $= 1 \cdot 0 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$ 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : $Y171 = 1$, car les contacts de S175 sont fermés.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile n'est pas autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : K03 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K03 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de K03 restent ouverts à cause du défaut. Les contacts de S151A, S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut. Ainsi, l'alimentation électrique est coupée au niveau de tous les embranchements de circuits découlant de ces trois interrupteurs. Alors, Y101 et Y171 sont désactivées. L'ordre « FERMER » n'est donc pas autorisé.

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K03 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : K03 bloqué à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « **K03 bloqué à 0** » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car cette défaillance crée la condition $\overline{K03} = 1$ qui est l'une des conditions requises pour que la commande Y101 du distributeur « D1 » s'active.

A10.8 Défaut unique : interrupteur K03 bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : K03 bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : les contacts du relais K01 restent fermés puisqu'il reste bloqué à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est

fermé. Les interrupteurs S151B et S175 sont relâchés (contacts fermés). L'interrupteur S151A est enfoncé (contacts fermés).

Fonctionnement du circuit analysé :

Fonctionnement avec K03 bloqué à 1 - protecteur de l'opérateur fermé :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
<ol style="list-style-type: none"> 1. K03 = 1, car ses contacts restent fermés en raison du défaut. 2. K01 s'active, car : $K01 = K03 + K01$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K01 = 1$ <p>De même pour K02, car :</p> $K02 = K03 + K02$ $= 1 + 0$ $\rightarrow K02 = 1$ 3. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{1} \cdot 1 \cdot 1$ $= 0 \cdot 1 \cdot 1$ $\rightarrow Y101 = 0$ 	<p>La commande Y171 du distributeur « D2 » s'active : $Y171 = 1$, car les contacts de S175 sont fermés.</p>
<p>Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :</p> $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 1 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

II. **LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE** (défaut : K03 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K03 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Les contacts de S151A, S151B et de S175 s'ouvrent puisqu'ils n'ont aucun défaut.

Fonctionnement avec K03 bloqué à 1 - le protecteur de l'opérateur s'ouvre :

Fonctionnement du circuit alimentant Y101	Fonctionnement du circuit alimentant Y171
1. Les contacts de K03 restent soudés (défaut), mais comme les contacts de S151A s'ouvrent, $K01 = 0$. De même, $K02 = 0$, car les contacts de S151B s'ouvrent. 2. La commande Y101 du distributeur « D1 » s'active, car : $Y101 = \overline{K03} \cdot K02 \cdot K01$ $= \overline{1} \cdot 0 \cdot 0$ $= 0 \cdot 0 \cdot 0$ $\rightarrow Y101 = 0$	La commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive : $Y171 = 0$, car les contacts de l'interrupteur S175 s'ouvrent.
Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée : $FERMER = Y171 \cdot Y101$ $= 0 \cdot 0$ $\rightarrow FERMER = 0$	

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : K03 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : K03 bloqué à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « K03 bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car cette défaillance ne crée pas la condition $\overline{K03} = 1$ qui

est l'une des conditions requises pour que la commande Y101 du distributeur « D1 » s'active.

A10.9 Défaut unique : interrupteur Y101 bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : Y101 bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : la commande Y101 reste désactivée, donc bloquée à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les contacts des interrupteurs S151A, S151B et S175 sont fermés.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur est fermé, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. Cependant, le présent défaut de la commande Y101 du distributeur « D1 » imposera sa désactivation permanente. Par ailleurs, la commande Y171 du distributeur « D2 » est activée : $Y171 = 1$, car les contacts de l'interrupteur S175 sont fermés. Alors, la fermeture du plateau mobile sera empêchée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 1 \cdot 0 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 0\end{aligned}$$

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : Y101 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y101 bloquée à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. La commande Y101 reste désactivée à cause du défaut. La commande Y171 devient désactivée : $Y171 = 0$, car ouvrir le protecteur ouvre les contacts de S175. Alors, la fermeture du plateau mobile est empêchée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 0 \cdot 0 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 0\end{aligned}$$

III. **LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME** (défaut : Y101 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y101 bloquée à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « Y101 bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car par sa désactivation, le distributeur « D1 » n'est pas activé.

A10.10 Défaut unique : interrupteur Y101 bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : Y101 bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : la commande Y101 reste activée, donc bloquée à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les contacts des interrupteurs S151A, S151B et S175 sont fermés.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur est fermé, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. Cependant, le présent défaut de la commande Y101 du distributeur « D1 » imposera son activation permanente. La commande Y171 du distributeur « D2 » est activée, car les contacts de l'interrupteur S175 sont fermés. Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 1 \cdot 1 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 1\end{aligned}$$

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : Y101 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y101 bloquée à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. Cependant, le défaut de la commande Y101 du distributeur « D1 » impose son

activation. Par ailleurs, la commande Y171 du distributeur « D2 » se désactive : $Y171 = 0$, car les contacts de S175 sont ouverts. Alors, la fermeture du plateau mobile est empêchée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 0 \cdot 1 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 0\end{aligned}$$

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : Y101 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y101 bloquée à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « **Y101 bloqué à 1** » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car une fois la machine alimentée, cette défaillance active en permanence le distributeur « D1 ».

A10.11 Défaut unique : interrupteur Y171 bloqué à 0

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : Y171 bloqué à 0)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : la commande Y171 reste désactivée, donc bloquée à 0. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les contacts des interrupteurs S151A, S151B et S175 sont fermés.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur est fermé, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. La commande Y101 du distributeur « D1 » est activée : $Y101 = 1$, car les contacts des interrupteurs S151A et S151B sont fermés et le circuit est alimenté. Cependant, le présent défaut de la commande Y171 du distributeur « D2 » impose sa désactivation. Alors, la fermeture du plateau mobile sera empêchée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 0 \cdot 1 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 0\end{aligned}$$

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : Y171 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y171 bloquée à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. La commande Y101 du distributeur « D1 » devient désactivée : $Y101 = 0$, car ouvrir le protecteur ouvre les contacts des interrupteurs S151A et S151B. La commande Y171 du distributeur « D2 » reste désactivée à cause du défaut. Alors, la fermeture du plateau mobile est empêchée :

$$\begin{aligned}\text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\ &= 0 \cdot 0 \\ \rightarrow \text{FERMER} &= 0\end{aligned}$$

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : Y171 bloqué à 0)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y171 bloquée à 0. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « Y171 bloqué à 0 » est un défaut dont la défaillance associée n'est pas dangereuse, car par sa désactivation, le distributeur « D2 » n'est pas activé.

A10.12 Défaut unique : interrupteur Y171 bloqué à 1

I. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR EST FERME (défaut : Y171 bloqué à 1)

Contexte :

Présence d'un seul défaut : la commande Y171 reste active, donc bloquée à 1. La presse vient d'être mise sous tension. Le protecteur de l'opérateur est fermé. Les contacts des interrupteurs S151A, S151B et S175 sont fermés.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur est fermé, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. La commande Y101 du distributeur « D1 » est activée, car les contacts des interrupteurs S151A et S151B sont fermés. Cependant, le présent défaut de la commande Y171 du distributeur « D2 » impose son activation. Alors, la fermeture du plateau mobile est autorisée :

$$\begin{aligned}
 \text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\
 &= 1 \cdot 1 \\
 \rightarrow \text{FERMER} &= 1
 \end{aligned}$$

II. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR S'OUVRE (défaut : Y171 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y171 bloquée à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur s'ouvre.

Fonctionnement du circuit analysé :

Lorsque le protecteur de l'opérateur s'ouvre, les interrupteurs et les relais du circuit fonctionnent tout comme décrit pour le fonctionnement en absence de défaut. La commande Y101 du distributeur « D1 » se désactive, car ouvrir le protecteur sépare les contacts des interrupteurs S151A et S151B. Cependant, le défaut de la commande Y171 du distributeur « D2 » impose son activation. Alors, la fermeture du plateau mobile est empêchée :

$$\begin{aligned}
 \text{FERMER} &= Y171 \cdot Y101 \\
 &= 1 \cdot 0 \\
 \rightarrow \text{FERMER} &= 0
 \end{aligned}$$

III. LE PROTECTEUR DE L'OPERATEUR SE REFERME (défaut : Y171 bloqué à 1)

Contexte :

Présence du défaut unique : Y171 bloquée à 1. La presse est sous tension. Le protecteur de l'opérateur se referme.

Fonctionnement du circuit analysé :

Nous revenons au même état et au même fonctionnement que lorsque le protecteur de l'opérateur était fermé.

Conclusion : le défaut unique « Y171 bloqué à 1 » est un défaut dont la **défaillance** associée est **potentiellement dangereuse**, car une fois la machine alimentée, cette défaillance active en permanence le distributeur « D2 ».

ANNEXE 11 – La directive « Machines » européenne

La directive « Machines » européenne définit les conditions essentielles requises à la santé et à la sécurité dans le domaine des machines en Communauté européenne. Ces conditions réglementent la conception et la mise en service des machines commercialisées dans la Communauté européenne [94] et ceci, dans l'optique de favoriser leur libre circulation sur le territoire [95]. La première version de la directive date de 1989 ; elle était référencée : 89/392/CEE [95]. D'autres versions ont vu le jour. À ce jour, la plus récente est celle de 2006 : 2006/42/CE, en vigueur depuis le 29 décembre 2009 pour remplacer sa précédente : celle de 1998 (98/37/CE) [94, 95].

Afin d'encadrer la mise en application des exigences de la directive, le Comité européen de normalisation (CEN) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ont développé un programme de normalisation portant sur la sécurité des machines [94]. Tel que mentionné à l'annexe 6, ces normes sont divisées en 3 types : A, B (B1, B2) et C. L'application d'une norme est volontaire, à moins qu'elle soit exigée par un règlement [95]. Par exemple, la directive « Machines », qui ne s'applique que pour la Communauté européenne, rend obligatoire l'application des normes désignées « harmonisées », c'est-à-dire des normes donnant présomption de conformité à la directive [95]. C'est la version la plus récente d'une norme qui doit être utilisée, à moins d'indication contraire par un règlement par exemple.

La directive de 2006 [96] définit ainsi le terme « machines » :

- ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement autre que la force humaine ou animale appliquée directement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie,
- ensemble visé au premier tiret, auquel manquent seulement des organes de liaison au site d'utilisation ou de connexion aux sources d'énergie et de mouvement,
- ensemble visé au premier et au deuxième tirets prêt à être installé et qui ne peut fonctionner en l'état qu'après montage sur un moyen de transport ou installation dans un bâtiment ou une construction,

- ensemble de machines visées au premier, au deuxième et au troisième tirets ou de quasi-machines visées au point g) qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement,
- ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux, dont un au moins est mobile, qui sont réunis en vue de soulever des charges et dont la seule force motrice est une force humaine directement appliquée.

ANNEXE 12 – Caractéristiques des composants de la FS

Voici tout d'abord l'explication de quelques intitulés de colonnes des tableaux de cette annexe :

« **Caractéristiques réelles** » : caractéristiques provenant du rapport de recherche R-557 [6] de l'IRSST, entrepris sur la presse à injection de plastique horizontale étudiée dans le présent document.

« **Caractéristiques hypothétiques** » : valeurs de paramètres par défaut issues du tableau C.1 de la norme *NF EN ISO 13849-1:2008*. Pour appliquer ces valeurs aux composants de l'étude, il a fallu prendre pour hypothèse que ces composants ont été conçus selon les critères des sections C.2 et C.3 de cette norme.

« **DC** » : couverture du diagnostic par défaut proposée dans le tableau E.1 de la norme *NF EN ISO 13849-1:2008*.

A12.1 Contexte « laboratoire IRSST » (S.O. = sans objet)

CANAL 1 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS)					
Identi- fication	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	interrupteurs	S151A Contact à ouverture forcée Diagnostic par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 2 000 000	3 333	0,99
		S151B Contact à ouverture forcée Interrupteur monté en actionnement mécanique positif des contacts Diagnostic par relais K03 à contacts guidés	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclu- sion de défauts
	relais	K01 Relais à contacts guidés Diagnostic par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 400 000	667	0,99
		K02 Relais à contacts guidés Diagnostic par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 400 000	667	0,99

CANAL 1 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS) (suite)

	Identi- fication	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	distributeur "D1"	Y101	Diagnostiquer par une carte électronique programmable dont on ignore le fonctionnement. Alors, on prend le pire cas : DC = 0	MTTF _d (années) 150	150	0,00
Diagnostic	relais	K03	Relais à contacts guidés	S.O.	S.O.	S.O.

CANAL 2 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS)

	Identification	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	interrupteur	S175	Contact à ouverture forcée Interrupteur monté en actionnement mécanique positif des contacts	S.O.	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclusion de défauts
	commande électrique du distributeur "D2"	Y171	S.O.	MTTF _d (années) 150	150	0,00
Diagnostic	carte électronique programmable	S/O	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.

A12.2 Contexte « usine »

CANAL 1 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS)					
Identi- fication	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	interrupteurs	S151A Contact à ouverture forcée Diagnosticqué par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 2 000 000	5	0,99
		S151B Contact à ouverture forcée Interrupteur monté en actionnement mécanique positif des contacts Diagnosticqué par relais K03 à contacts guidés	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclusio n de défauts
	relais	K01 Relais à contacts guidés Diagnosticqué par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 400 000	1	0,99
		K02 Relais à contacts guidés Diagnosticqué par relais K03 à contacts guidés	B _{10d} (cycles) 400 000	1	0,99

CANAL 1 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS) (suite)						
	Identi- fication	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	distributeur "D1"	Y101	Diagnostiquer par une carte électronique programmable dont on ignore le fonctionnement. Alors, on prend le pire cas : DC = 0	MTTF _d (années) 150	150	0,00
Diagnostic	relais	K03	Relais à contacts guidés	S.O.	S.O.	S.O.

CANAL 2 : Caractéristiques des composants (des SRP/CS)						
	Identification	Numéro	Caractéristiques réelles	Caractéristiques hypothétiques	MTTF _d (années)	DC
Fonctionnel	interrupteur	S175	Contact à ouverture forcée Interrupteur monté en actionnement mécanique positif des contacts	S.O.	S.O., car exclusion de défauts	S.O., car exclusion de défauts
	commande électrique du distributeur "D2"	Y171	S.O.	MTTF _d (années) 150	150	0,00
Diagnostic	carte électronique programmable	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.

ANNEXE 13 – Calculs pour les contextes : « labo. » et « usine »

Contexte « laboratoire IRSST »

Le contexte d'utilisation de la presse dans ce laboratoire est adopté pour calculer l'équivalent en MTTF_d des B_{10d} de certains composants. Le B_{10d} représente le « nombre de cycles jusqu'à ce que 10 % des composants échouent dangereusement (pour des composants pneumatiques et électromécaniques) » [2].

Cette presse est généralement utilisée à des fins de démonstration et d'études expérimentales. En moyenne, elle est utilisée à la fréquence suivante (informations basées sur l'année 2010) :

		S151A	K01, K02
Nombre moyen de jours d'utilisation par années	d_{op} (d)	5	5
Nombre moyen d'heures d'utilisation par jour	h_{op} (h)	2	2
Temps moyen entre le démarrage de 2 cycles successifs du composant en secondes par cycle	t_{cycle} (s/c)	6	6
Nombre de cycles par an	n_{op} (c/a)	6000,00	6000,00

N.B. À cause de l'exclusion de défauts, le tableau précédent ne mentionne pas les interrupteurs S151B et S175. Conformément à l'*ISO 13849-1*, cette exclusion dispense de les intégrer dans les calculs relatifs à l'estimation du PL_{réel}.

Le paramètre n_{op} se calcule selon la formule suivante tirée de l'*ISO 13849-1* :

$$n_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600s/h}{t_{cycle}}$$

Il permet de trouver le MTTF_d avec la formule suivante tirée aussi de l'*ISO 13849-1* [2]:

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \times n_{op}}$$

Le $MTTF_d$ de chacun des composants qui ne bénéficient pas de l'exclusion de défauts est calculé selon la formule précédente ou est tirée du tableau C.1 de l'ISO 13849-1. Les B_{10d} des composants proviennent du tableau C.1 de la norme. Les caractéristiques (ex. : $MTTF_d$, DC) des composants se retrouvent à l'annexe 12.

CONTEXTE « LABO. » - Calcul du $MTTF_d$ pour le canal 1, selon la section D.1 de l'ISO 13849-1 :

$$\begin{aligned}
 MTTF_{d \text{ CANAL1}} &= \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{d \text{ S151A}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ K01}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ K02}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ Y101}}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{3\,333 \text{ années}} + \frac{1}{667 \text{ années}} + \frac{1}{667 \text{ années}} + \frac{1}{150 \text{ années}}}
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow MTTF_{d \text{ CANAL1}} \approx 100,33 \text{ année}$$

CONTEXTE « LABO. » - Calcul du $MTTF_d$ pour le canal 2, selon la section D.1 de l'ISO 13849-1 :

$$\begin{aligned}
 MTTF_{d \text{ CANAL2}} &= \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{d \text{ Y171}}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{150 \text{ années}}}
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow MTTF_{d \text{ CANAL2}} = 150 \text{ années}$$

CONTEXTE « LABO. » - Calcul du $MTTF_d$ pour la structure, selon la section D.2 de l'ISO 13849-1 :

$$\begin{aligned}
 MTTF_d &= \frac{2}{3} \left(MTTF_{d \text{ CANAL1}} + MTTF_{d \text{ CANAL2}} - \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{d \text{ CANAL1}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ CANAL2}}}} \right) \\
 &= \frac{2}{3} \left(100,33 \text{ année} + 150 \text{ années} - \frac{1}{\frac{1}{100,33 \text{ année}} + \frac{1}{150 \text{ années}}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow (MTTF_d)_{\text{labo.}} \approx 126,81 \text{ années}$$

Comme la section 4.5.2 de l'ISO 13849-1 exige 100 comme valeur maximale pour le MTTF_d par canal, ramenons la valeur trouvée à 100 :

$$\rightarrow (MTTF_d)_{\text{labo.}} = 100 \text{ années} \quad \rightarrow MTTF_d \text{ élevé}$$

La valeur du MTTF_d pour le contexte « labo. » est élevée puisqu'elle appartient à la plage des MTTF_d élevés, établie par le tableau 5 de la norme : 30 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans.

CONTEXTE « LABO. » - Calcul de la DC_{avg} selon la section E.2 de l'ISO 13849-1 :

$$\begin{aligned} DC_{\text{avg}} &= \frac{\frac{DC_{S151A}}{MTTF_{d \text{ S151A}}} + \frac{DC_{K01}}{MTTF_{d \text{ K01}}} + \frac{DC_{K02}}{MTTF_{d \text{ K02}}} + \frac{DC_{Y101}}{MTTF_{d \text{ Y101}}} + \frac{DC_{Y171}}{MTTF_{d \text{ Y171}}}}{\frac{1}{MTTF_{d \text{ S151A}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ K01}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ K02}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ Y101}}} + \frac{1}{MTTF_{d \text{ Y171}}}} \\ &= \frac{\frac{0,99}{3\,333 \text{ années}} + \frac{0,99}{667 \text{ années}} + \frac{0,99}{667 \text{ années}} + \frac{0,00}{150 \text{ années}} + \frac{0,00}{150 \text{ années}}}{\frac{1}{3\,333 \text{ années}} + \frac{1}{667 \text{ années}} + \frac{1}{667 \text{ années}} + \frac{1}{150 \text{ années}} + \frac{1}{150 \text{ années}}} \end{aligned}$$

$$\rightarrow DC_{\text{avg}} \approx 0,1964$$

$$\rightarrow (DC_{\text{avg}})_{\text{labo.}} \approx 19,64 \% \quad \rightarrow DC_{\text{avg}} \text{ nulle}$$

La valeur de la DC_{avg} pour le contexte « labo. » est nulle puisqu'elle appartient à la plage des DC nulles, établie par le tableau 6 de la norme : DC < 60 %.

Contexte « usine »

Maintenant, adoptons le contexte d'utilisation de la presse pour une usine du Québec, afin de calculer l'équivalent en MTTF_d des B_{10d} de certains composants de la FS. En moyenne, la presse est utilisée à la fréquence suivante :

		S151A	K01, K02
Nombre moyen de jours d'utilisation par années	d_{op} (d)	350	350
Nombre moyen d'heures d'utilisation par jour	h_{op} (h)	20	20
Temps moyen entre le démarrage de 2 cycles successifs du composant en secondes par cycle	t_{cycle} (s/c)	6	6
Nombre de cycles par an	n_{op} (c/a)	4 200 000	4 200 000

Les caractéristiques (ex. : MTTF_d, DC) des composants pour le contexte « usine » se retrouvent à l'annexe 12.

CONTEXTE « USINE » - Calcul du MTTF_d pour le canal 1, selon la section D.1 de l'ISO 13849-1 :

Rappelons qu'en raison de l'exclusion de défauts s'appliquant aux interrupteurs : S151B et S175, ces composants ne sont pas pris en compte dans les calculs ci-dessous.

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF}_{\text{d CANAL1}} &= \frac{1}{\frac{1}{\text{MTTF}_{\text{d S151A}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{\text{d K01}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{\text{d K02}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{\text{d Y101}}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{5 \text{ années}} + \frac{1}{1 \text{ année}} + \frac{1}{1 \text{ année}} + \frac{1}{150 \text{ années}}}
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{MTTF}_{\text{d CANAL1}} \approx 0,43 \text{ année}$$

CONTEXTE « USINE » - Calcul du MTTF_d pour le canal 2, selon la section D.1 de la NF EN ISO 13849-1:2008 :

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF}_{\text{d CANAL2}} &= \frac{1}{\frac{1}{\text{MTTF}_{\text{d Y171}}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{150 \text{ années}}}
 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{MTTF}_{\text{d CANAL2}} = 150 \text{ années}$$

CONTEXTE « USINE » - Calcul du MTTF_d pour la structure, selon la section D.2 de la *NF EN ISO 13849-1:2008* :

$$\begin{aligned} \text{MTTF}_d &= \frac{2}{3} \left(\text{MTTF}_{d \text{ CANAL } 1} + \text{MTTF}_{d \text{ CANAL } 2} - \frac{1}{\frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ CANAL } 1}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ CANAL } 2}}} \right) \\ &= \frac{2}{3} \left(0,43 \text{ année} + 150 \text{ années} - \frac{1}{\frac{1}{0,43 \text{ année}} + \frac{1}{150 \text{ années}}} \right) \end{aligned}$$

$$\rightarrow (\text{MTTF}_d)_{\text{usine}} = 100 \text{ années} \quad \rightarrow \text{MTTF}_d \text{ élevé}$$

La valeur du MTTF_d pour le contexte « usine » est élevée puisqu'elle appartient à la plage des MTTF_d élevés, établie par le tableau 5 de la norme : 30 ans ≤ MTTF_d ≤ 100 ans.

CONTEXTE « USINE » - Calcul de la DC_{avg} selon la section E.2 de la *NF EN ISO 13849-1:2008* :

$$\begin{aligned} \text{DC}_{\text{avg}} &= \frac{\frac{\text{DC}_{\text{S151A}}}{\text{MTTF}_{d \text{ S151A}}} + \frac{\text{DC}_{\text{K01}}}{\text{MTTF}_{d \text{ K01}}} + \frac{\text{DC}_{\text{K02}}}{\text{MTTF}_{d \text{ K02}}} + \frac{\text{DC}_{\text{Y101}}}{\text{MTTF}_{d \text{ Y101}}} + \frac{\text{DC}_{\text{Y171}}}{\text{MTTF}_{d \text{ Y171}}}}{\frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ S151A}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ K01}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ K02}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ Y101}}} + \frac{1}{\text{MTTF}_{d \text{ Y171}}}} \\ &= \frac{\frac{0,99}{5 \text{ années}} + \frac{0,99}{1 \text{ année}} + \frac{0,99}{1 \text{ année}} + \frac{0,00}{150 \text{ années}} + \frac{0,00}{150 \text{ années}}}{\frac{1}{5 \text{ années}} + \frac{1}{1 \text{ année}} + \frac{1}{1 \text{ année}} + \frac{1}{150 \text{ années}} + \frac{1}{150 \text{ années}}} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{DC}_{\text{avg}} \approx 0,9843$$

$$\rightarrow (\text{DC}_{\text{avg}})_{\text{usine}} \approx 98,43 \% \quad \rightarrow \text{DC}_{\text{avg}} \text{ moyenne}$$

La valeur de la DC_{avg} pour le contexte « usine » est moyenne puisqu'elle appartient à la plage des DC moyennes, établie par le tableau 6 de la norme : 90 % ≤ DC < 99 %.

ANNEXE 14 – Contexte « labo. » - résultats obtenus avec SIStema

SIStema - Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications v1.1.4

Fichier Edition Affichage Aide

Nouveau Ouvrir... Sauvegarder Fermer Projet Bibliothèque Rapport Aide Assistant

Projets

- ✗ PR Validation d'une fonction de sécurité_contexte usine
- ✗ PR Validation d'une fonction de sécurité_contexte "labo. IRSST"
- ✗ SF arrêt et empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile par l'ouverture du protecteur de l'opérateur
 - ✓ SB SRP/CS
 - ✓ CH Canal 1
 - ✓ BL S151A : interrupteur de position
 - ✓ EL S151A : interrupteur de position
 - ✓ BL S151B : interrupteur de position
 - ✓ EL S151B : interrupteur de position
 - ✓ BL K01 : relais
 - ✓ EL K01 : relais
 - ✓ BL K02 : relais
 - ✓ EL K02 : relais
 - ✓ BL Y101 : commande électrique du distributeur "D1" (distributeur en amont)
 - ✓ EL Y101 : commande électrique du distributeur "D1" (distributeur en amont)

Tableau des résultats :

PLr	PL	PFH [1/h]
e	c	1,14E-6

SB -

PL	PFH [1/h]	Cat.	MTTFd [a]	DCavg [%]	CCF
-	-	-	-	-	-

BL -

MTTFd [a]	DC [%]
-	-

EL -

MTTFd [a]	DC [a]
-	-

Presses-papiers: X Bibliothèque sélectionnée: "Bibliothèque SIStema par défaut"

Documentation PLr PL Sous-systèmes

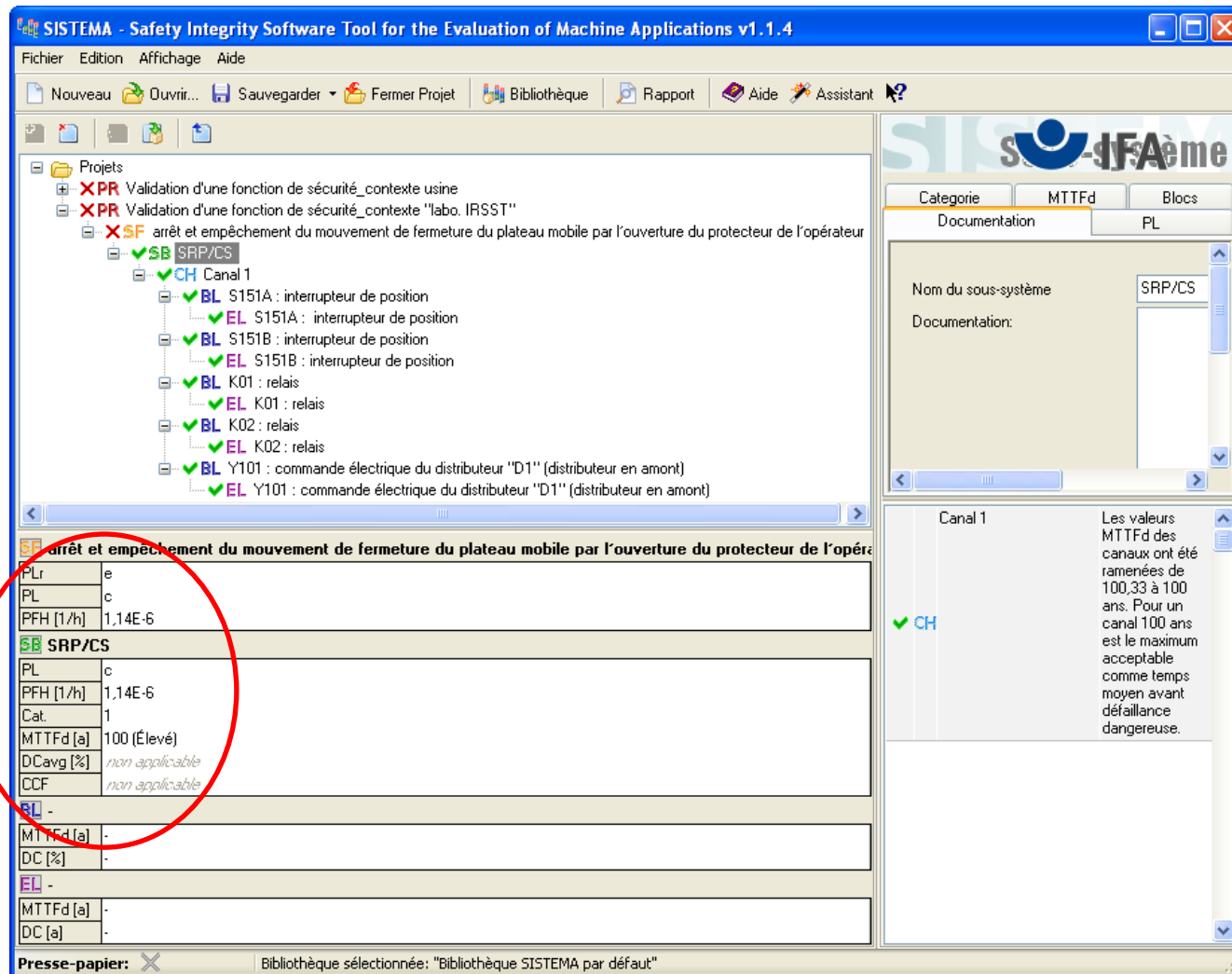
Déterminez le PL à partir des sous-systèmes

Niveau de Performance (PL): c

Le niveau de performance requis (PLr = e) n'est pas atteint par cette fonction de sécurité. Conseil: Voir onglet 'Sous-systèmes' colonne 'PL'

Canal 1

Les valeurs MTTFd des canaux ont été ramenées de 100,33 à 100 ans. Pour un canal 100 ans est le maximum acceptable comme temps moyen avant défaillance dangereuse.



ANNEXE 15 – Contexte « usine » - résultats obtenus avec SIStema

SISTEMA - Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications v1.1.4

Fichier Edition Affichage Aide

Nouveau Ouvrir... Sauvegarder Fermer Projet Bibliothèque Rapport Aide Assistant

Projets

- ✗ PR Validation d'une fonction de sécurité_contexte usine
 - ✗ SF arrêt et empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile par l'ouverture du protecteur de l'opérateur
 - ✗ SB SRP/CS
 - ✗ CH Canal 1
 - BL S151A : interrupteur de position
 - EL S151A : interrupteur de position
 - BL S151B : interrupteur de position
 - EL S151B : interrupteur de position
 - BL K01 : relais
 - EL K01 : relais
 - BL K02 : relais
 - EL K02 : relais
 - BL Y101 : commande électrique du distributeur "D1" (distributeur en amont)
 - EL Y101 : commande électrique du distributeur "D1" (distributeur en amont)
 - CH Canal 2
 - BL S175 : interrupteur de position
 - EL S175 : interrupteur de position
 - BL Y171 : commande électrique du distributeur "D2"
 - EL Y171 : commande électrique du distributeur "D2"

- ✗ PR Validation d'une fonction de sécurité_contexte "labo. IRSST"

arrêt et empêchement du mouvement de fermeture du plateau mobile par l'ouverture du protecteur de l'opérateur

PLr	e
PL	e
PFH [1/h]	4.16E-8
SB SRP/CS	
PL	e
PFH [1/h]	4.16E-8
Cat.	3
MTTFd [a]	66,67 (Élevé)
DCavg [%]	98,43 (Moyenne)
CCF	65 (Pleinement rempli)
MTTFd [a]	-
DC [%]	-
EL	-
MTTFd [a]	-
DC [a]	-

Sous-système IFA

Documentation PL Catégorie MTTFd DCavg CCF Blocs

Nom du sous-système: SRP/CS

Documentation:

✗ CH Canal 1	Pour ce canal une valeur incorrecte de MTTFd est calculée (inférieure à trois ans).
S151A : interrupteur de position	Pour les architectures désignées un temps de mission typique de 20 ans est supposé. Cet élément a un T10d de 0,48 ans (voir l'onglet MTTFd), qui est inférieur à cette valeur. Veuillez vous assurer du changement à temps de cet élément.
✗ BL K01 : relais	Pour ce bloc une valeur incorrecte de MTTFd est calculée (inférieure à trois ans).
K01 : relais	Pour les architectures désignées un temps de mission typique de 20 ans est supposé. Cet élément a un T10d de 0,1 ans (voir l'onglet MTTFd), qui est inférieur à cette valeur. Veuillez vous assurer du changement à temps de cet élément.
✗ EL K01 : relais	Pour cet élément une valeur incorrecte de MTTFd est calculée (inférieure à trois ans).
✗ BL K02 : relais	Pour ce bloc une valeur incorrecte de MTTFd est calculée (inférieure à trois ans).
K02 : relais	Pour les architectures désignées un temps de mission typique de 20 ans est supposé. Cet élément a un T10d de 0,1 ans (voir l'onglet MTTFd), qui est inférieur à cette valeur. Veuillez vous assurer du changement à temps de cet élément.
✗ EL K02 : relais	Pour cet élément une valeur incorrecte de MTTFd est calculée (inférieure à trois ans).
CH Canal 2	Les valeurs MTTFd des canaux ont été ramenées de 150 à 100 ans. Pour un canal 100 ans est le maximum acceptable comme temps moyen avant défaillance dangereuse.

Presse-papier: Bibliothèque sélectionnée: "Bibliothèque SISTEMA par défaut"